INFORME ANUAL
CALIDAD DEL AIRE
2020
CIUDAD DE MÉXICO

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | SEDEMA | CALIDAD DEL AIRE

Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente

Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director General de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández
Directora de Monitoreo de Calidad del Aire

Mónica del Carmen Jaimes Palomera
Subdirectora de Análisis y Modelación

Alfredo Alonso Soler
Subdirector de Análisis Meteorológico

Miguel Sánchez Rodríguez
Subdirector de Monitoreo de Calidad del Aire

José Luis del Río Jáuregui
Subdirector de Sistemas y Comunicaciones

PRESENTACIÓN

Durante el año 2020, a nivel mundial se presentó una pandemia ocasionada por el virus SARS-CoV-2, que causa la enfermedad respiratoria llamada COVID-19. En México, se registró el primer caso durante febrero y después, se extendió rápidamente en el país, lo que provocó múltiples contagios y fallecimientos. La pandemia cambió las circunstancias cotidianas y se aplicaron medidas drásticas para evitar la dispersión del virus. En marzo, inició la suspensión de actividades, en diversas oficinas se implementó el trabajo a distancia y se cancelaron los eventos masivos, así como los viajes no esenciales. Durante abril se aplicó la Fase 3 de Emergencia Sanitaria, con mayores limitaciones en la movilidad y de actividades no esenciales. En términos de calidad del aire, las diversas restricciones contribuyeron a reducir la emisión de contaminantes, en consecuencia, se registraron niveles bajos de contaminación, sobre todo de contaminantes primarios relacionados con el tránsito vehicular, como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno; sin embargo, en contaminantes secundarios, como el ozono y partículas secundarias que forman parte de las $PM_{2.5}$, la pandemia tuvo un efecto reducido durante la temporada seca caliente (marzo-mayo) y en noviembre, se activó la única contingencia ambiental por ozono. La pandemia también afectó la operación del SIMAT, ya que, en las estaciones ubicadas en edificios de hospitales, no se permitió el ingreso al personal operativo. En términos de la normatividad de calidad del aire, en febrero de 2020 inició la aplicación de dos nuevas normas, la primera fue del Índice AIRE y SALUD (NOM-172-SEMARNAT-2019), que sustituyó al Índice de Calidad del Aire, este último aún se calcula y publica en la página de aire de la CDMX y en la app “Aire” como referencia. El objetivo del nuevo Índice AIRE y SALUD es unificar el reporte de la calidad del aire, con un índice homologado a nivel nacional para las ciudades con redes de monitoreo atmosférico. El índice tiene niveles de riesgo asociados a la contaminación, así como recomendaciones para proteger la salud. Adicionalmente, la NOM para SO_2 (NOM-022-SSA1-2019) fue actualizada y su aplicación también inició en febrero, la nueva NOM tuvo cambios relevantes en los límites y en el algoritmo de cálculo para evaluar el SO_2.

Las estaciones que conforman el SIMAT alcanzan cobertura para las 16 alcaldías de la CDMX y 26 municipios conurbados del Estado de México. A partir de los datos que se generan en el SIMAT, diariamente se difunde información sobre el estado de la contaminación atmosférica y condiciones meteorológicas, se han desarrollado programas y políticas públicas para mejorar la calidad del aire y ha sido posible observar las tendencias de los contaminantes a través del tiempo. Adicionalmente el SIMAT es responsable de la integración y desarrollo del presente Informe.

El Informe Anual de Calidad del Aire 2020 inicia con el análisis del cumplimiento de la normatividad para cada uno de los contaminantes criterio y su comparación con estándares internacionales. Posteriormente, se describe el comportamiento de las variables meteorológicas registradas durante el año. En el capítulo 3 de calidad del aire, se analizan las variaciones de los contaminantes criterio y su tendencia, así como, la revisión del comportamiento del Índice AIRE y SALUD. El único evento de contingencia de 2020 se describe en el capítulo 4, donde se analiza el desarrollo y causas del evento de alta concentración de ozono. En el capítulo 5 referente al depósito atmosférico, se revisa las características físicas y químicas del agua de lluvia, como la medición del pH, el cual determina la acidez de la lluvia.

En este informe, se presenta un capítulo especial, que describe y analiza el comportamiento y cambio en la concentración de los contaminantes durante la pandemia COVID-19, la cual afectó las actividades cotidianas en la ZMCM. Finalmente, el capítulo sobre la especiación química de aerosoles, que complementa el análisis de la contaminación durante la pandemia, se describe la concentración de los marcadores de COV presentes en la atmósfera y su relación con las restricciones de actividades.

Secretaría del Medio Ambiente

Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire

Diseño
Paola Guadalupe Hernández Sánchez
Montserrat Martínez Mendoza

Integración del documento
Mónica Jaimes Palomera, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Citlalli Mendoza Munguía, Jorge Lara Osorio, Olivia Rivera Hernández.

Gráficas y estadísticos
Citlalli Mendoza Munguía
Ángel Fragoso Chino
Claudia Lizeth Florean Cruz
Brenda González Calderón

D.R. © 2023

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
Plaza de la Constitución No 1, 3er piso, Colonia Centro, Cuauhtémoc, Ciudad de México, C.P. 06068

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

La mención de marcas o compañías no implica que sean validadas o recomendadas por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. La Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire tomó todas las precauciones razonables para verificar la información contenida en esta publicación. La responsabilidad de la interpretación y uso de material recae en el lector. En ningún caso la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México podrá ser considerada responsable de daño alguno causado por el uso indebido del documento por parte de terceros.

Citar este documento como:
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. 2023. **Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe anual 2020**. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

CALIDAD DEL AIRE

La información de este documento es el resultado de un trabajo de equipo realizado por el personal técnico y operativo de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire, quienes cada día desarrollan una labor importante con dedicación y compromiso.

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire
Olivia Rivera Hernández

Subdirección de Análisis y Modelación
Mónica del Carmen Jaimes Palomera, Alejandro Jonathan Gallardo Pérez, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Eduardo Preciado Martínez, Jorge Luis Lara Osorio, Francisco Luna Falfan, Sofía Fernanda Moreno Gillestegui, Citlalli Mendoza Munguía, Laura Edith Ocampo Trejo, Víctor Jorge Taracena Morales, Antonio Terrazas Ahumada, Omar Alejandro Quijada Pérez, Ángel Fragoso Chino, Claudia Lizeth Florean Cruz, Brenda González Calderón.

Subdirección de Análisis Meteorológico
Alfredo Alfonso Soler, Milena Ávalos Torres.

Subdirección de Monitoreo de Calidad del Aire
J. J. Miguel Sánchez Rodríguez, Alfonso López Medina, Jorge J. Domínguez Ochoa, Arturo Galicia Zepeda, Julio C. Argueta Rodríguez, Fernando Vega Bernal, Adrián Pérez Narváez, Antonio Silva Hernández, J. Gabriel Elías Castro, Salvador Cervantes Garduño, Eugenio López Arredondo, Eloy Contreras Sánchez, Jorge Hernández Hernández, Jesús Jiménez Valdez, Ángel Sánchez Martínez, Ernesto González Carmona, José Juárez Mendoza, María del R. Carmona Mártir, Jesús Arriaga Falconi, Anabel Rivera Arenas, Ma Dolores Maya Rojas, Viviana J. Campos Torres, Donaldo M. Godínez Ángeles, Ulises J. López Fabián, Daniel A. Rivera Ávila, Abraham López Dorantes, Ma Luisa Quintanar Chávez, Fernando Reyes Sandoval, José A. González Aguayo.

Subdirección de Sistemas y Comunicaciones
José Luis del Río Jáuregui, Juan Manuel Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Leyda Castro Rodríguez, Julio César Martínez Alpízar, Gabriela Hernández Cruz, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdés Espinosa, Jorge Cornejo Martínez, Ramón Gaona Díaz, Víctor Manuel Muñoz Valladares, Luis Enrique Ruiz López, Erick Consejo Valenzuela, Christian Alberto Martínez Lozano.

Administración
Margarita Barrientos Contreras, Xóchitl Loretto Carmona, Adriana Ramírez Tecla, Francisco J. Serrano Vázquez, Carla Mayorga Domínguez, Samuel López Venegas, Stephanie Montero Bending.

En la elaboración de este informe se tuvo la colaboración de investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera y del Instituto de Geofísica de la UNAM.

El Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático: Análisis del depósito atmosférico: Rodolfo Sosa Echeverría, Ana Luisa Alarcón Jiménez. Especiación química de aerosoles orgánicos atmosféricos: Dr. Amador Muñoz Omar, Enrique Hernández López, Alberto García Ibarra, Yadira Martínez Domínguez.

Instituto de Geofísica (radiación solar global): Dr. Mauro Valdés Barrón

También se reconoce todo el apoyo brindado por las diferentes áreas operativas de la Dirección Ejecutiva de Administración.

Índice

Resumen ejecutivo 11

Capítulo 1: Cumplimiento de la normatividad 14
- Dióxido de azufre 18
- Dióxido de nitrógeno 23
- Monóxido de carbono 27
- Ozono 30
- Partículas PM_{10} 34
- Partículas $PM_{2.5}$ 38

Capítulo 2: El Tiempo 42
- Temperatura 43
- Humedad relativa 46
- Precipitación 48
- Viento 49
- Presión atmosférica 52
- Radiación solar ultravioleta 54
- Índice UV 55

Capítulo 3: Calidad del aire 58
- Dióxido de azufre 62
- Óxido de nitrógeno 66
- Monóxido de carbono 72
- Ozono 76
- Partículas suspendidas (PM_{10}, $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$) 81
- Tendencia 88
- Índice AIRE y SALUD 94
- Índice de riesgo para personas susceptibles (IRPS) 104

Capítulo 4: Eventos de alta concentración 106
- Activación Fase I O_3: 11 de noviembre 109

Capítulo 5: Depósito atmosférico 112
- Campaña 2020 114
- Precipitación acumulada 115
- pH 117
- Composición iónica 119
- Depósito Atmosférico 120

Capítulo 6: Pandemia COVID-19 y calidad del aire 122
- Impacto de la pandemia en la movilidad de la CDMX 124
- Análisis de los contaminantes durante la restricción de movilidad 126
- Análisis semanal de los contaminantes en 2020 y años anteriores 132

Análisis de máximos por año 138
Análisis de la concentración de ozono en días similares 144

Capítulo 7: Especiación química horaria de aerosoles atmosféricos 152
Campaña EQAA3 153
Introducción 153
Método 154
Resultados 154
Efecto de las restricciones a la movilidad por COVID-19 en la concentración de contaminantes orgánicos no regulados 163

Referencias 166

Anexos
I. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX 178
II Operación del SIMAT 184
III. Estaciones nuevas 192
IV. Estadísticas básicas 194
V. Historial de contingencias ambientales 212
VI. Mosaicos de calidad del aire 216

Dedicamos este Informe en memoria:

A todas las personas que laboran en la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire que se enfermaron, fueron hospitalizadas o que perdieron a algún familiar durante la pandemia por COVID-19

ACRÓNIMOS

Acrónimo/ Abreviatura	Definición
AQFS-CDMX	Air Quality Forcast System para la Ciudad de México – Sistema de pronóstico de calidad del aire para la Ciudad de México
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis, es un órgano de coordinación administrativa intergubernamental que integra al gobierno federal de México, el gobierno de la Ciudad de México y los gobiernos de los estados de Hidalgo, Morelos, México, Puebla, Tlaxcala y Querétaro
CDMX	Ciudad de México
CN	Carbono negro
CNe	Carbono negro equivalente
OC	Carbono orgánico
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAHCyT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
EC	Carbono elemental equivalente al carbono negro
EQAA3	Especiación química de aerosoles atmosféricos 3ª campaña
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency – Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HR	Humedad relativa
IAyS	Índice Aire y Salud
IRPS	Índice de Riesgo para Personas Susceptibles
IUV	Índice de radiación ultravioleta
MD	Media semanal de los promedios diarios
MM	Media semanal de los máximos diarios
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration – Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
NOM	Norma Oficial Mexicana
WMO, OMM	World Meteorological Organization - Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
PA	Presión atmosférica
PP	Precipitación pluvial en mm de lluvia
PM_{co}	Partículas gruesas (2.5 a 10 micras)
PPRECAA	Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas,
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SINAICA	Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire
SSA	Secretaría de Salud
T, TMP	Temperatura
UV-A y UV-B	Radiación ultravioleta A y ultravioleta B

Acrónimo/ Abreviatura	Definición
WSP, VV	Velocidad del viento, en inglés wind speed (WSP)
WDR, DV	Dirección del viento, en inglés wind direction (WDR)
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México conformada por 16 alcaldías de la Ciudad de México y 26 municipios conurbados del Estado de México, es el área determinada por la cobertura espacial de las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México, conformada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios conurbados del Estado de México y un municipio del Estado de Hidalgo

ESTACIONES DEL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CDMX

Sitios en la Ciudad de México	
AJU	Ajusco
AJM	Ajusco medio
BJU	Benito Juárez
CAM	Camarones
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
TEC	Cerro del Tepeyac
COR	CORENADER (Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural)
CUA	Cuajimalpa
DIC	DICONSA (Distribuidora e Impulsora Comercial CONASUPO)
EAJ	Ecoguardas Ajusco
EDL	Exconvento Desierto de los Leones
GAM	Gustavo A. Madero
HGM	Hospital General de México
IZT	Iztacalco
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
IBM	Legaria
LOM	Lomas
MER	Merced
MGH	Miguel Hidalgo
MPA	Milpa Alta
MCM	Museo de la Ciudad de México
PED	Pedregal
SNT	San Nicolás Totolapan
SFE	Santa Fe
SAC	Santiago Acahualtepec
TAH	Tláhuac
UIZ	Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa
UAX	Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco

Sitios en el Estado de México	
ACO	Acolman
ATI	Atizapán
CHO	Chalco
CUT	Cuautitlán
FAC	Facultad de Estudios Superiores Acatlán
FAR	Facultad de Estudios Superiores Aragón
INN	Instituto de Investigaciones Nucleares
LPR	La Presa
LLA	Los Laureles
MON	Montecillo
NEZ	Nezahualcóyotl
SAG	San Agustín
TLA	Tlalnepantla
TLI	Tultitlán
VIF	Villa de las Flores
XAL	Xalostoc

RESUMEN EJECUTIVO

En febrero de 2020 entró en vigor la actualización de la **norma** para SO_2 (NOM-022-SSA1-2019), que establece nuevos límites y algoritmos para evaluar el promedio horario y promedio de 24 h, durante 2020 estos nuevos límites fueron superados ambas entidades de la ZMCM. El NO_2 y CO cumplieron con sus límites normados (NOM-023-SSA1-1994 y NOM-021-SSA1-1994). En el caso de O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$, los límites de sus respectivas normas (NOM-020-SSA1-2014 y NOM-025-SSA1-2014) fueron superados en CDMX y EDOMEX, los valores más altos de ozono se presentaron en la CDMX, mientras que los máximos de partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) fueron en el EDOMEX.

La **REDMET** registró una temperatura promedio anual de 17 °C y el promedio mensual máximo fue en abril (19.7 °C) mientras que el mínimo fue en enero (13.8 °C). La humedad relativa presentó un promedio anual de 52.4 %, los mínimos se registraron de febrero a mayo con 42 % y los máximos fueron de junio a septiembre, este último con 67%. Este año fue el cuarto más seco desde 1941. Respecto a la velocidad del viento, el promedio mensual máximo fue en junio con 2.5 m/s y el mínimo en diciembre con 2 m/s. El campo de viento predominante en el año, fue dirección del norte-noreste hacia el sur-suroeste. La presión atmosférica osciló entre 584.6 y 585.9 mmHg reportados en mayo y noviembre, respectivamente.

La **calidad del aire** en 2020 presentó circunstancias particulares debidas al confinamiento por la pandemia de COVID-19, como fue la cantidad de sitios de monitoreo con información disponible, ya que de 34 estaciones que conforman la RAMA, solo 22 tuvieron suficiencia anual. Con este número de estaciones se determinó que el promedio anual del SO_2 fue muy similar al del año anterior con 3.2 ppb, con los valores más altos en los sitios del norte de la ZMCM, el máximo para el promedio de 24h fue de 37 ppb y para el valor horario fue 170 ppb, ambos en VIF. Por otro lado, los promedios anuales de NOx, NO_2 y NO fueron de 30, 19 y 10 ppb respectivamente. De noviembre a febrero se presentaron los valores más altos de los tres óxidos de nitrógeno. La estación PED mostró reducciones respecto al año anterior del 45 % para NOx, 39 % para NO_2 y 75 % para NO. El CO tuvo un máximo del promedio móvil de 8h de 2.5 ppm en SAC y su promedio anual fue 0.32 ppm (16% menor a 2019). Respecto al O_3, el promedio anual fue similar a 2019 con 31.3 ppb. La estación CCA registró 355 horas que superaron 95 ppb. La concentración máxima del año para el promedio horario fue 159 ppb durante el 11 de noviembre en CCA, este valor activó la única contingencia del año, fuera de la temporada de ozono, el mismo día SFE registró 117 ppb para el máximo del promedio móvil de 8h. Por último, en las partículas, los promedios anuales fueron de 36, 17 y 19 $\mu g/m^3$ para PM_{10}, $PM_{10\text{-}2.5}$ y $PM_{2.5}$. A nivel estación, $PM_{2.5}$ tuvo un promedio anual máximo de 23.8 $\mu g/m^3$ en SAC, PM_{10} fue 50.4 $\mu g/m^3$ en VIF y $PM_{10\text{-}2.5}$ tuvo 28.6 $\mu g/m^3$.

El máximo del promedio de 24h de PM_{10} fue a 177 µg/m³ en VIF, en $PM_{2.5}$ fue 63 µg/m³ en UIZ y para $PM_{10-2.5}$ también fue 63 µg/m³. Por último, en los valores horarios, el máximo de PM_{10} fue 615 µg/m³ en VIF, en $PM_{2.5}$ registró 189 µg/m³ en UIZ y $PM_{10-2.5}$ fue 369 µg/m³ en SAG.

En febrero del 2020 entró en vigor el nuevo **Índice AIRE Y SALUD** (NOM-172-SEMARNAT-2019), este índice desarrollado por SEMARNAT tiene como objetivo homologar el cálculo y reporte de calidad del aire a nivel nacional. La evaluación con los nuevos lineamientos del Índice AIRE Y SALUD considerando todos los contaminantes, se obtuvieron 125 días limpios con calidad del BUENA y ACEPTABLE, mientras que, en 229 días fue MALA o superior. En el análisis mensual, enero tuvo mejor calidad del aire, ya que solo tuvo 9 días en categoría MALA y dos en MUY MALA. En el análisis por contaminante, el O_3 tuvo 208 días con Índice en MALA o MUY MALA, mientras que en PM_{10} fueron 68 y $PM_{2.5}$ tuvo 10 días. En la comparación con 2019 y con el mismo Índice AIRE y SALUD, O_3 tuvo un incremento del 6 % de días en la categoría MALA o MUY MALA en CDMX y en el EDOMEX hubo una reducción del 28 %. En PM_{10}, ambas entidades, presentaron reducción del 76 % (CDMX) y 64 % (EDOMEX). En PM_{10}, también se registraron disminuciones del 79 % (CDMX) y 87 % (EDOMEX).

En la evaluación del **Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS),** un índice multicontaminante (O_3+$PM_{2.5}$+NO_2) dirigido a personas sensibles a la contaminación, en general, el IRPS respondió correctamente a la concentración alta durante la temporada de ozono, en meses cálidos y secos (marzo a junio), así como en la temporada de partículas, en invierno (noviembre a febrero). El IRPS obtuvo sus valores más bajos durante la época de lluvia, que es la más limpia. El riesgo **Bajo** del IRPS (1 a 3 en la escala) obtuvo su mayor conteo de días en septiembre con 13, seguido de agosto con 10. En el riesgo **Alto** (IRPS de 7 a 9), mayo tuvo el máximo de días con 8 y el IRPS más alto del año fue 9, registrado el 21 de mayo. Durante la contingencia de ozono del 11 de noviembre, el IRPS fue 7.

En la aplicación del programa de contingencias (**PPRECAA**), se registró un evento de Fase I por ozono. Esto ocurrió por la presencia de un sistema anticiclónico que ocasionó vientos muy débiles del noreste. El 11 de noviembre, el máximo de ozono se alcanzó a las 16:00 h en la estación CCA con 159 ppb, con lo que se declaró la Fase I de contingencia y el pronóstico meteorológico indicaba condiciones adversas. Al siguiente día se registró un máximo de 145 ppb en SFE, por lo que más tarde, a las 20:00 h, se suspendió la contingencia.

La campaña de la **REDDA** fue afectada por las restricciones ocasionadas por la pandemia COVID-19, ya que de los 16 sitios que conforman la red, solo 9 continuaron en operación y el número de muestreos semanales disminuyó considerablemente. El promedio anual de la precipitación acumulada fue de 488 mm, con un máximo en EDL de 772 mm y en agosto se presentó el máximo con 1,461 mm. El pH mínimo de la

lluvia fue de 4.07 y se registró en la estación COR, mientras que el pH máximo fue 6.5 en MON. Los iones más abundantes en el depósito atmosférico húmedo fueron sulfatos (SO_4^{2-}) con 11.65 kg/ha y nitratos (NO_3^-) con 8.5 kg/ha.

La pandemia por **COVID-19** en la ZMVM, ocasionó restricciones desde el 19 de marzo, como el trabajo remoto y restricción de la movilidad, esto ocasionó una reducción de 60 a 80% en el tránsito vehicular. En consecuencia, CO y los NOx (contaminantes primarios), relacionados con emisiones vehiculares, tuvieron reducciones del 23 % en CO, 55 % para NO, 32 % de NO_2 y 39 % para NOx. En O_3 (contaminante secundario), el máximo se redujo en un 14 %; sin embargo, el promedio diario aumentó 8 %. En PM_{10} hubo reducciones de 21 % en el máximo y 33 % en el promedio diario; pero en mayo presentaron un aumento del 42 % en el máximo diario, causado por incendios forestales. En $PM_{2.5}$, la mayor reducción fue del 40 % para el máximo y 41 % para el promedio diario, los incendios también influyeron y se registró un incremento del 16 % del promedio diario. Durante 2020, los máximos de NO fueron menores a 300 ppb. En O_3, el porcentaje de días con concentración menor a 130 ppb fue del 89 % y la proporción de máximos mayores a 131 ppb fue la menor de los últimos 10 años.

El comportamiento del O_3 de marzo a mayo se analizó mediante la comparación de días con condiciones meteorológicas similares del 2010 a 2019 y se estimó que, de presentarse las mismas condiciones meteorológicas y de emisiones normales, en 8 a 15 días se hubiera superado el valor de 154 ppb (FI de contingencia).

La 3ª campaña de Especiación Química de Aerosoles Atmosféricos (**EQAA3**) se realizó del 2 al 23 de mayo en el ICAyCC-UNAM, durante la pandemia COVID-19. La campaña se dividió en dos **subperiodos**, del 2 al 12 de mayo (**no incendios**) y del 13 al 23 de mayo (**incendios**). En el subperiodo de incendios, se registró un aumento de reteno, marcador de quema de biomasa (coníferas). En el levoglucosan, marcador de quema de biomasa general, no hubo diferencia entre subperiodos, significa que la quema de biomasa de otras especies fue menos intensa que la de coníferas. El total de HAPs cancerígenos (**∑HAPs**), marcadores de quema incompleta de combustibles, tuvieron mayor concentración en el subperiodo de incendios. En los ftalatos, DBF (agente plastificante) y DEHF (plastificante de material médico, muebles, cosméticos, entre otros), no tuvieron diferencias entre subgrupos. Los resultados para quinonas, la antraquinona (Antrona) no tuvo diferencias entre los subperiodos, pero en la benzantrona (Bzona) sí, con mayor concentración en el subperiodo de incendios. Se identificaron tres tipos de comportamientos horarios. Uno con máximos en la noche (reteno), el segundo fue bimodal con máximos por la mañana y en la tarde-noche (ΣHAPs, DEHF, Bzona) y el tercero fue asintótico ($PM_{2.5}$, levoglucosan, DBF y Antrona). En 2020, se presentaron porcentajes de reducción en estos compuestos orgánicos no regulados. La concentración de los marcadores de tránsito vehicular, ΣHAPs, Bzona y DEFH, disminuyeron 68 %, 49 % y 36 %, respectivamente. La concentración del DBF (agentes plastificantes) redujo en 52 % mientras que la concentración de la Anona (transporte) disminuyó 20 %.

INFORME ANUAL
2020

CAPÍTULO 1

CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD

El efecto negativo de la contaminación en la salud humana es el aspecto más preocupante para las autoridades responsables de la salud pública y la protección del medio ambiente. En los últimos años, la evidencia científica revela que los efectos en salud asociados a la contaminación del aire se observan a concentraciones más bajas, lo que ha ocasionado que la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualice sus valores guía recomendados para la protección de la salud y, en consecuencia, varios países revisan y ajustan sus estándares de calidad del aire de acuerdo a sus capacidades e infraestructura, con el objetivo de que se puedan cumplir las guías de la OMS en el corto o largo plazo.

El monitoreo atmosférico es una herramienta indispensable para determinar la calidad del aire en una ciudad y provee de información relevante para los tomadores de decisiones y la población, sobre la concentración de los principales contaminantes en el aire que afectan la salud. Además, permite observar el resultado de la aplicación de políticas públicas para la reducción de emisiones contaminantes y mejora de la calidad del aire.

El monitoreo está ligado a la normatividad vigente de salud, ya que se mide la concentración de los contaminantes criterio los cuales tienen valores límite en la normatividad y su objetivo es proteger la salud de la población. Estos límites se conocen como estándares de calidad del aire y se han establecido en la normatividad para no ser superados en un tiempo y área determinada.

En la mayoría de los países, los estándares de calidad del aire no coinciden con los valores guía que recomienda la OMS, lo cual es uno de los aspectos que genera mayor preocupación e interés dentro de la comunidad y los gestores en salud y medio ambiente. Sin embargo, aunque la OMS tiene como objetivo el cumplimiento de sus valores guía para la reducción de riesgos en la salud, también considera que las normas y estándares de calidad del aire en cada país están sujetos a sus propias condiciones locales, así como a diferentes factores políticos, económicos y sociales, por lo tanto, cada país puede adoptar diferentes enfoques según sus aptitudes tecnológicas y nivel de desarrollo, así como su capacidad de gestionar las acciones que les permitan reducir las emisiones que contribuyen a la mejora de la calidad del aire. Debido a esto, la OMS ha establecido valores intermedios superiores a las guías, con el objetivo de que los países alcancen los valores recomendados de forma gradual a través de programas de gestión y mitigación de la contaminación y proteger la salud de la población (OMS, 2017).

En México, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental establecen límites en la concentración de siete contaminantes: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), partículas menores a 10 y 2.5 µm (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y Plomo (Pb). Son de observancia obligatoria en todo el territorio nacional, para las autoridades federales y locales que tengan a su cargo la vigilancia y evaluación de la calidad del aire.

Las NOM están diseñadas para proteger a la población de los efectos dañinos de la contaminación a corto y largo plazo. La elaboración y actualización de las NOM que establecen los límites para cada contaminante son responsabilidad de la Secretaría de Salud (SSA) de México a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). Mientras que es responsabilidad del gobierno federal y local la aplicación de medidas para la reducción de la contaminación que permitan cumplir con las normas establecidas.

En la **Tabla 1.1** se presentan las normas de salud vigentes en 2020 y se especifican sus valores límites, indicadores estadísticos utilizados para su evaluación, así como la última fecha de actualización.

Tabla 1.1. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental, vigentes en 2020.

CONTAMINANTE	NOM VIGENTE	ESPECIFICACIONES		ÚLTIMA ACTUALIZACIÓN
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014	**95 ppb** **70 ppb**	Promedio 1 h Promedio móvil 8 h	19/Agosto/2014
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	**11 ppm**	Promedio móvil 8h	23/Diciembre/1994
Dióxido de azufre (SO_2)	NOM-022-SSA1-2019	**75 ppb** **40 ppb**	Promedio trianual del P99 del máximo de 1 h, Máximo trianual del promedio de 24 h	20/Agosto/2019
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-1993	**210 ppb**	Promedio 1 h	23/Diciembre/1994
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	NOM-025-SSA1-2014	**75 µg/m³** **40 µg/m³**	Promedio 24 h Promedio anual	20/Agosto/2014
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)		**45 µg/m³** **12 µg/m³**	Promedio 24 h Promedio anual	
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	**1.5 µg/m³**	Promedio trimestral	23/Diciembre/1994

En la **Tabla 1.2** se presenta un resumen del cumplimiento de los valores límite de las NOM, los valores guía OMS y estándares de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA), desglosado por Ciudad de México (CDMX) y Estado de México (municipios conurbados a la Ciudad de México –EDOMEX).

En general, el SO_2 no cumplió con los límites de la NOM y OMS en ambas entidades mientras que los valores de la U.S. EPA se cumplieron en CDMX, pero no en EDOMEX. Para CO y NO_2, sus máximos no rebasaron ningún estándar, las PM_{10} solamente cumplieron con los estándares de la U.S. EPA en ambas entidades; finalmente, las $PM_{2.5}$ y el O_3, no cumplieron con ningún estándar.

A continuación, se presenta la evaluación detallada del cumplimiento de las NOM durante 2020 en la ZMCM, la cual comprende las 16 alcaldías de la CDMX y 26 municipios conurbados del Estado de México. Se describen los efectos adversos de cada contaminante, la situación de su concentración máxima con respecto a los valores límite e indicadores de la NOM, así como su comparación con las guías OMS y los estándares de la U.S. EPA (NAAQS), con el objetivo de analizar la situación del aire de la ZMCM a nivel internacional.

En el **Anexo IV** de este informe se pueden consultar los datos completos para los indicadores de las NOM que se registraron en las estaciones de monitoreo durante 2020.

Tabla 1.2. Resumen del cumplimiento de las NOM, valores guía OMS y las NAAQS de la U.S. EPA en 2020.

Contaminante	NOM		OMS		U.S. EPA	
	CDMX	EDOMEX	CDMX	EDOMEX	CDMX	EDOMEX
SO_2	✗	✗	✗	✗	✓	✗
NO_2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
O_3	✗	✗	✗	✗	✗	✗
PM_{10}	✗	✗	✗	✗	✓	✓
$PM_{2.5}$	✗	✗	✗	✗	✗	✗

✓ **Cumple con el valor**
✗ **No cumple con el valor**

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El dióxido de azufre (SO_2) es parte del grupo de compuestos químicos formados por azufre y oxígeno llamados óxidos de azufre (SOx). De manera general, la variedad de efectos en salud del SO_2 pueden incluir (*American Lung Association*, 2023):

- Irritación en los ojos, la nariz y la garganta.
- Inflamación pulmonar y la hiperreactividad de las vías respiratorias.
- Mucosidad nasal, asfixia, tos y constricción de los bronquios (CDC, 2023)
- Reducción de la capacidad pulmonar.
- Sibilancias, dificultad para respirar y opresión en el pecho y problemas durante el ejercicio o la actividad física.
- En personas asmáticas se incrementan sus síntomas respiratorios y tienen un mayor riesgo de ingresos hospitalarios o visitas a emergencias.
- La exposición crónica a niveles altos (>1 ppm) puede ocasionar una mayor incidencia de síntomas y enfermedades pulmonares, así como mayor riesgo de mortalidad (CARB, 2023).
- Los adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o pulmonares crónicas tienen más riesgo de padecer efectos adversos.

Existe gran evidencia de los efectos a **corto plazo**, de acuerdo con la última Evaluación Científica Integrada (ISA por sus siglas en inglés) de la U.S. EPA, se ha encontrado que el SO_2 tiene una relación causal con los efectos respiratorios, especialmente, la exacerbación del asma debido a que ocasiona disminución de la función pulmonar en adultos y niños que tienen este padecimiento (U.S. EPA, 2017).

También existen estudios que reportan que un incremento de 10 $\mu g/m^3$ (5 ppb, 17°C, 585 mmHg) en la concentración del promedio de 24 h, aumenta el riesgo por mortalidad total y respiratoria; mientras que el mismo aumento en el máximo horario puede incrementar el riesgo por mortalidad respiratoria (Orellano et al., 2021; OMS, 2021). Adicionalmente, se tiene evidencia que el SO_2 puede aumentar el riesgo de ingreso hospitalario por accidente cerebrovascular isquémico y hemorrágico (Shen et al., 2020).

En la exposición a **largo plazo**, la U.S. EPA ha determinado que existe evidencia sugestiva pero no suficiente para asociar el SO_2 con efectos en salud; sin embargo, hay evidencia sugestiva de estudios epidemiológicos que relacionan este contaminante con incrementos en la incidencia de asma infantil (U.S. EPA, 2017).

Actualización de la Norma Oficial Mexicana para SO_2.

El 20 de agosto de 2019 se publicó la actualización de la norma para SO_2, la cual entró en vigor durante febrero del 2020. En la NOM-022-SSA1-2019 se establecen los nuevos criterios y límites para la evaluación de la concentración de SO_2 y realiza cambios importantes en el manejo de datos. Uno de los cambios principales fueron los indicadores estadísticos y sus límites, ya que la norma anterior (NOM-022-SSA1-2010) establecía tres límites para indicadores como el promedio de 24 h (110 ppb), promedio anual (25 ppb) y móvil de 8 h (200 ppb), mientras que la NOM actual solo establece dos indicadores, el promedio horario con un valor límite de 75 ppb y el límite del promedio de 24 h es de 40 ppb.

A diferencia de la NOM anterior, en la NOM-022-SSA1-2019, el cálculo de los indicadores normados se realiza con los datos de tres años consecutivos (el año a evaluar y los dos anteriores). El valor límite de una hora se calcula como el promedio de los percentiles 99 (P_{99}) de la concentración horaria de los tres años, mientras que el límite de 24 horas es el máximo de los promedios diarios en los tres años. Es importante señalar que los 3 años considerados deben cumplir con criterios estrictos de suficiencia (trianual, trimestral, mensual y diaria). Para evaluar el cumplimiento, esta norma incluye procedimientos para determinar la validez de cálculo del indicador horario en aquellas estaciones de monitoreo que no cumplen con la suficiencia de datos necesaria (trianual, mensual, trimestral y/o diaria). En el caso del indicador del promedio de 24 horas, la NOM establece criterios para evaluarla con uno, dos o tres años completos. Es importante mencionar que los criterios y procedimientos para la evaluación de los dos límites tienen diversas excepciones que se deben revisar con detalle para evitar interpretaciones erróneas.

Los procedimientos en la NOM tienen concordancia con el manejo de datos de la U.S. EPA en su estándar primario de SO_2 y tienen como objetivo evitar la exclusión de sitios que podrían considerarse de importancia. Adicionalmente, la NOM actual establece un método para identificar los eventos excepcionales (concentraciones altas o extremas), mediante el cálculo de un umbral por estación. Los eventos excepcionales no son utilizados en la determinación de los valores límites debido a que son consecuencia de eventos naturales, emisiones que no pueden ser controladas y que es poco probable que sucedan nuevamente en el mismo sitio donde se registraron. El cálculo del umbral de evento excepcional tiene concordancia con el procedimiento establecido por la U.S. EPA y tiene fundamento en la variación de los datos horarios en los meses con la concentración más alta (Anexo A.3 de la NOM-022-SSA1-2019).

Evaluación de la NOM

En la **Figura 1.1** se presenta la serie de tiempo de los indicadores establecidos en la NOM-022-SSA1-2019, de 1989 al 2020, en la que se observa que en el indicador horario se tuvo una reducción importante de concentración; sin embargo, se ha mantenido casi constante en los últimos diez años, con su valor mínimo en 2016 y 2020. En el indicador de 24 horas se observa mayor variabilidad a través de los años y su mínimo se registró en 2016. Es importante señalar que la NOM del 2010 para SO_2 se cumplió desde el 2006 hasta 2019; sin embargo, ya no se cumple con la NOM actual y los nuevos límites con niveles más bajos de concentración.

En la **Tabla 1.3** se observa que ambas entidades de la ZMCM excedieron los nuevos límites normados, con los valores más altos en el EDOMEX y en esta entidad, el máximo del indicador horario fue casi el doble del límite normado. Cerca del EDOMEX, en la zona norte, existen fuentes externas de SO_2 que pueden influir en los valores altos, como la refinería de Tula y la termoeléctrica en Hidalgo. En cuanto a los indicadores internacionales, el SO_2 máximo superó todos los límites, de la OMS y U.S. EPA, tanto en CDMX, como en el EDOMEX.

A nivel estación (**Figura 1.2**), se observó que Camarones (CAM) en la CDMX registró el máximo del indicador horario (NOM y U.S. EPA) con 97 ppb; sin embargo, este sitio no cumplió con todos los criterios de suficiencia establecidos en la NOM, por lo que la siguiente estación con el valor más alto que sí cumplió con suficiencia fue Merced (MER) con 74 ppb. En el caso del EDOMEX, el máximo del indicador horario fue en la estación Tultitlán (TLI) con 153 ppb, pero tampoco cumple con la suficiencia de datos; por lo que la siguiente con el valor más alto fue Villa de las Flores (VIF) con 147 ppb.

Para el promedio de 24 horas de la NOM, el máximo se presentó en la estación CAM de la CDMX con 47 ppb, que en este caso sí cumplió la suficiencia para este indicador; mientras que, en el EDOMEX fue en VIF con 67 ppb. Finalmente, en el límite de la OMS (24 h), el máximo en CDMX y EDOMEX se presentaron en las mismas estaciones, CAM (31 ppb) y VIF (37 ppb), respectivamente.

Es importante mencionar que varias estaciones de CDMX y EDOMEX tienen valores menores a los límites, nacionales e internacionales; sin embargo, los máximos son los que determinan el cumplimiento de la NOM en la ZMCM.

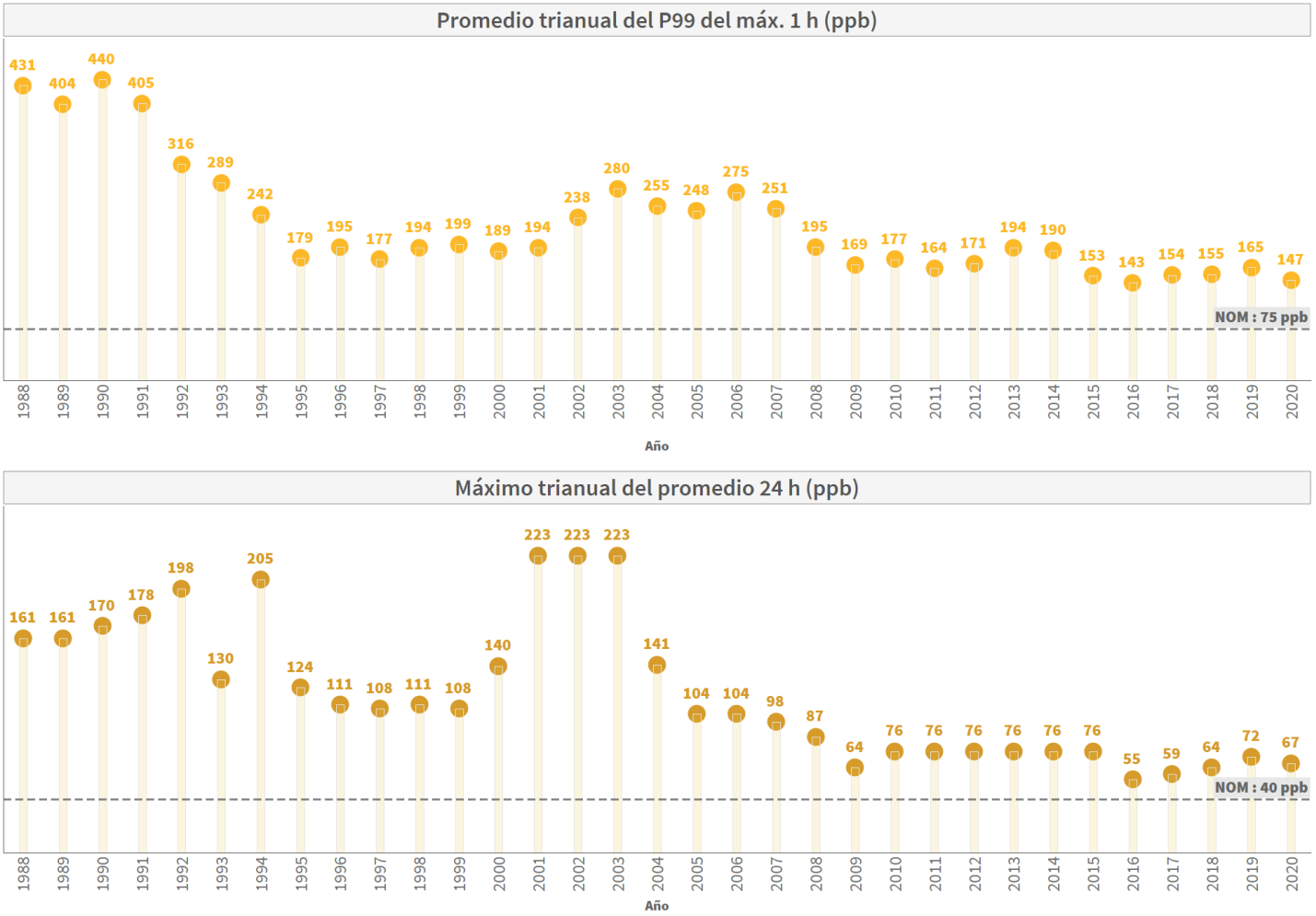


Figura 1.1. Promedio trianual del P_{99} máx. 1 h (arriba) y Máximo trianual del promedio 24 h (abajo) de SO_2 desde 1989 al 2020.

Tabla 1.3. Valores de concentración máxima de SO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS	U.S. EPA
	Promedio trianual del P99 máx. 1 h	Máximo trianual del promedio 24 h	Promedio 24 h*	Promedio trianual del P99 máx. 1 h
	75 ppb	40 ppb	20 µg/m³	75 ppb
ZMCM	147 ppb	67 ppb	77 µg/m³	147 ppb
CDMX	74 ppb	47 ppb	64 µg/m³	74 ppb
EDOMEX	147 ppb	67 ppb	77 µg/m³	147 ppb

*Conversión a una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

No cumple con los valores límite.

La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

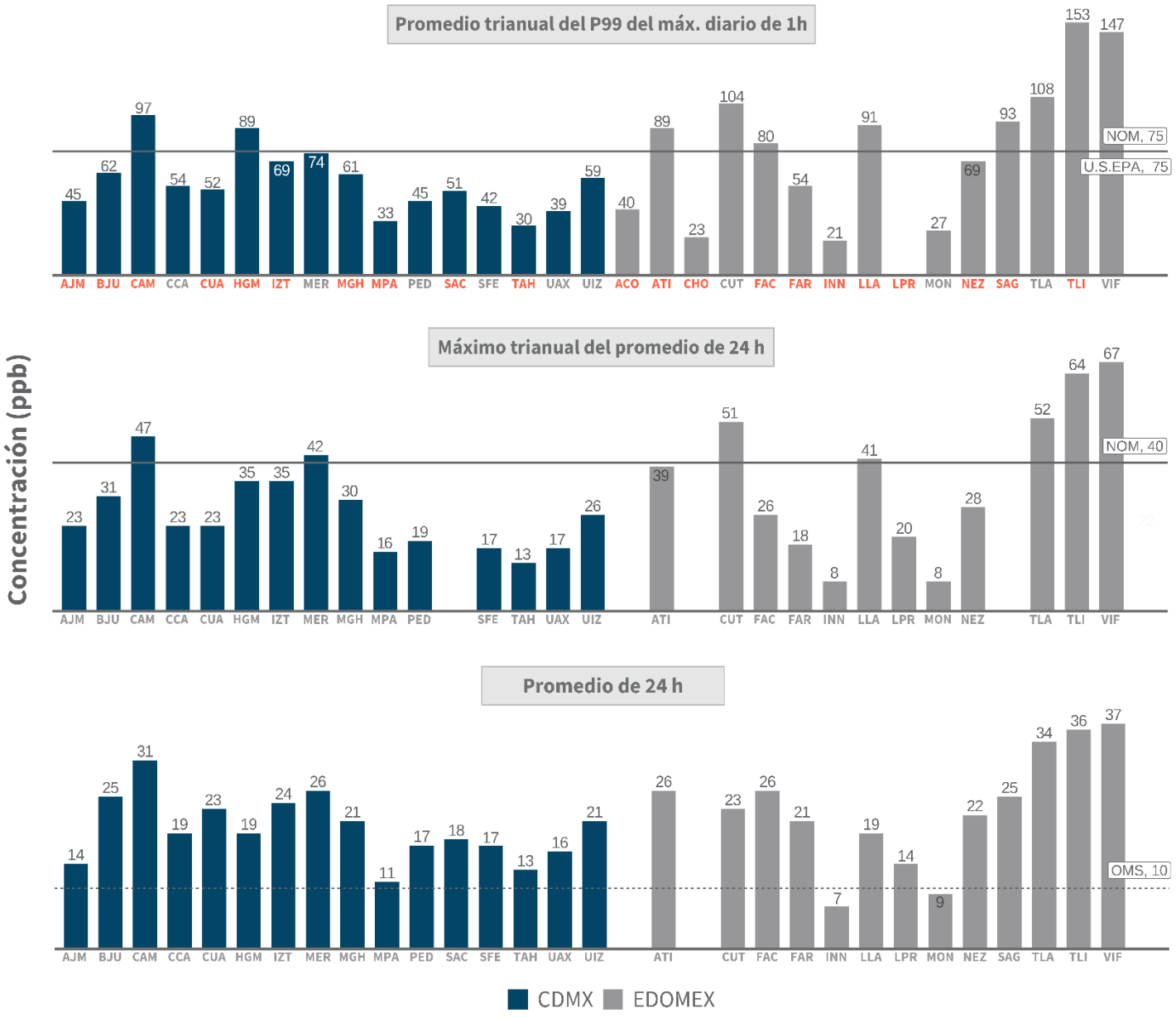


Figura 1.2. Valores de concentración máxima de SO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo. Los sitios en color rojo indican que no cumplieron con todos los criterios de suficiencia establecidos en la NOM-022-SSA1-2019.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO_2)

El dióxido de nitrógeno (NO_2), es un contaminante gaseoso y pertenece al grupo de óxidos de nitrógeno (NOx) provenientes de la quema de combustibles fósiles. Los niveles de NO_2 en el ambiente pueden tener diversos efectos a corto y largo plazo, principalmente en el sistema respiratorio. De acuerdo con la *American Lung Association* (2022), este contaminante se ha relacionado con la inflamación de vías respiratorias, reducción de la función pulmonar, el empeoramiento de tos, sibilancias y ataques de asma.

En los efectos a **corto plazo** (24 horas), se ha estimado que la exposición al NO_2 causa un incremento importante en el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares, respiratorias e incluso COVID-19. La fuerte asociación entre el NO_2 y la mortalidad respiratoria es debido a que el sistema respiratorio es el primero en estar expuesto al contaminante por medio de la inhalación (Wang et al., 2021). La exposición al NO_2 está altamente relacionada con la exacerbación del asma y se correlaciona con un mayor riesgo de visitas a emergencias y admisiones hospitalarias asociadas con este padecimiento, además se ha determinado que el grupo de niños y adultos mayores con asma son los más susceptibles (Zheng et al., 2021).

En la exposición a **largo plazo** al NO_2 , existe evidencia que indica que dicho contaminante puede incrementar el riesgo de causar muerte prematura, especialmente mortalidad en padecimientos respiratorios como la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC) e infección aguda de las vías respiratorias inferiores (Huangfu & Atkinson, 2020). Se ha estimado que las personas que padecen cáncer pulmonar tienen mayor riesgo por la exposición a NO_2, O_3 y partículas, estos contaminantes pueden acortar su supervivencia (Eckel et al., 2016). Además, hay estudios que asocian un cambio en la incidencia de cáncer pulmonar asociada a la exposición a niveles altos de NO_2 relacionada tránsito vehicular (Hamra et al., 2015).

Estudios enfocados en adultos mayores, han determinado que la exposición a NO_2 aumenta el riesgo de enfermedad cerebrovascular, cardiopatías isquémicas y neumonía, entre otros padecimientos (Eum et al., 2018). En niños, los estudios epidemiológicos han presentado asociaciones sobre la incidencia de asma pediátrico, es decir, asma de nueva aparición. Se estima que aproximadamente el 13 % de la incidencia de asma pediátrico es atribuible al NO_2 y este porcentaje aumenta al 50 % en las 250 ciudades más pobladas del mundo (Anenberg et al., 2019).

Evaluación de la NOM

Debido a los daños en salud documentados y a la evidencia epidemiológica sobre los diferentes efectos en salud del NO_2, se han establecido estándares de calidad del aire a nivel mundial. En México, la normatividad que regula los niveles de este contaminante es la NOM-023-SSA1-1994, la cual establece el límite máximo permisible de 210 ppb para la concentración horaria, el cual no debe ser superado más de una vez al año.

En la ZMCM, la concentración del NO_2 ha cumplido con los valores límite de la NOM-023-SSA1-1994 desde 2006. En la **Figura 1.3** se presenta la serie de tiempo para el cumplimiento de la NOM de NO_2 desde 1988 hasta 2020 y se puede observar que hay una tendencia notable en la reducción del máximo horario. En los años 2006 y 2009, el límite de 210 ppb se superó solamente una vez al año, por lo que todavía se cumplió con lo establecido en la NOM-023-SSA1-1994.

En los siguientes años, el valor máximo horario de NO_2 no excedió el límite normado y esta reducción en la concentración fue consecuencia directa del desarrollo e implementación de programas para mejorar la calidad del aire en la ZMCM, específicamente en acciones dirigidas a las fuentes móviles, las cuales representan la mayor contribución en emisiones de NOx, precursor de NO_2.

En los Inventarios de Emisiones del año 2004 y 2006, ya se presentaban reducciones importantes en las emisiones de NOx ocasionadas por las estrategias sobre las fuentes móviles, como fue la renovación del parque vehicular debido a la aplicación del Programa Hoy No Circula, la implementación de convertidor catalítico en automóviles, mejoramiento de la infraestructura del transporte público, entre otras acciones (SEDEMA, 2006; 2008).

En la **Tabla 1.4** se observa que, durante 2020 ambas entidades de la ZMCM cumplieron con los límites NOM, OMS y U.S. EPA, con los valores máximos en CDMX. En el análisis por estación (**Figura 1.4**), se observa que el máximo horario (NOM y OMS) fue 118 ppb en Iztacalco (IZT) para la CDMX, mientras que en el EDOMEX fue de 113 ppb en el sitio FES Acatlán (FAC). En el indicador del promedio anual (OMS y U.S. EPA) el máximo para CDMX fue en MER con 27 ppb y 26 ppb en Tlalnepantla (TLA) y TLI en el EDOMEX. Por último, los valores más altos para el indicador trianual de la U.S. EPA se registraron en MER y FAC con 82 ppb y 86 ppb, respectivamente.

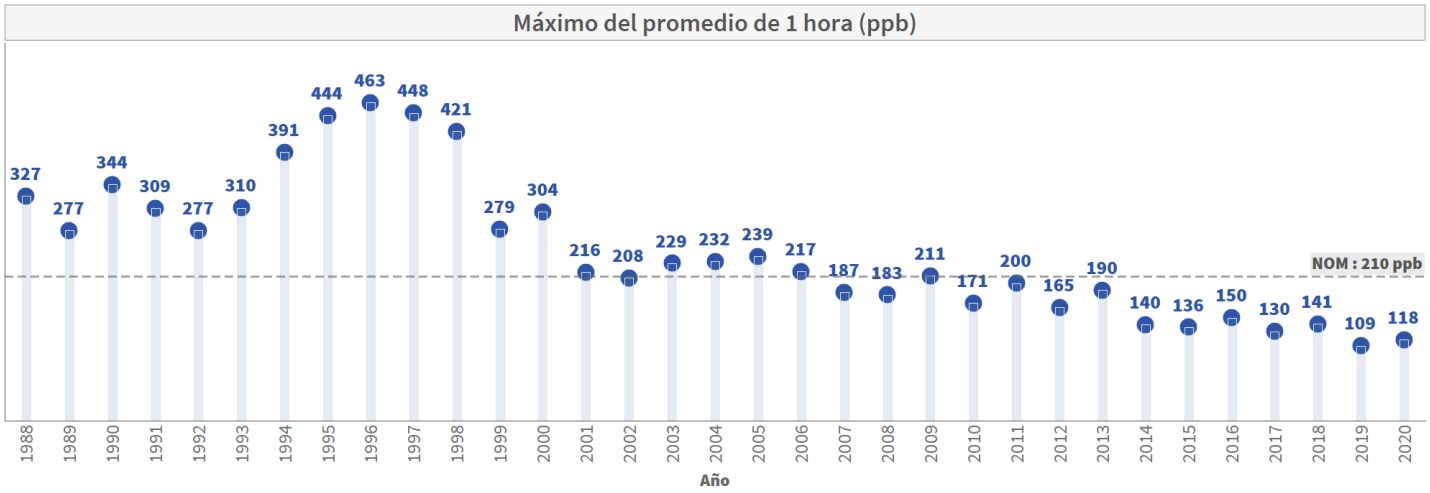


Figura 1.3. Concentración máxima horaria de NO_2 desde 1988 al 2020.

Tabla 1.4. Valores de concentración máxima de NO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-1994, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM	OMS		U.S. EPA	
	No exceder máximo 1 h	Máximo 1 h*	Promedio anual*	Promedio trianual del P98 del máximo 1h	Promedio anual
	210 ppb	200 µg/m³	40 µg/m³	100 ppb	53 ppb
ZMCM	0 horas	176 $\mu g/m^3$	40 $\mu g/m^3$	86 ppb	27 ppb
CDMX	0 horas	176 $\mu g/m^3$	40 $\mu g/m^3$	82 ppb	27 ppb
EDOMEX	0 horas	168 $\mu g/m^3$	39 $\mu g/m^3$	86 ppb	26 ppb

*Conversión a una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.
La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

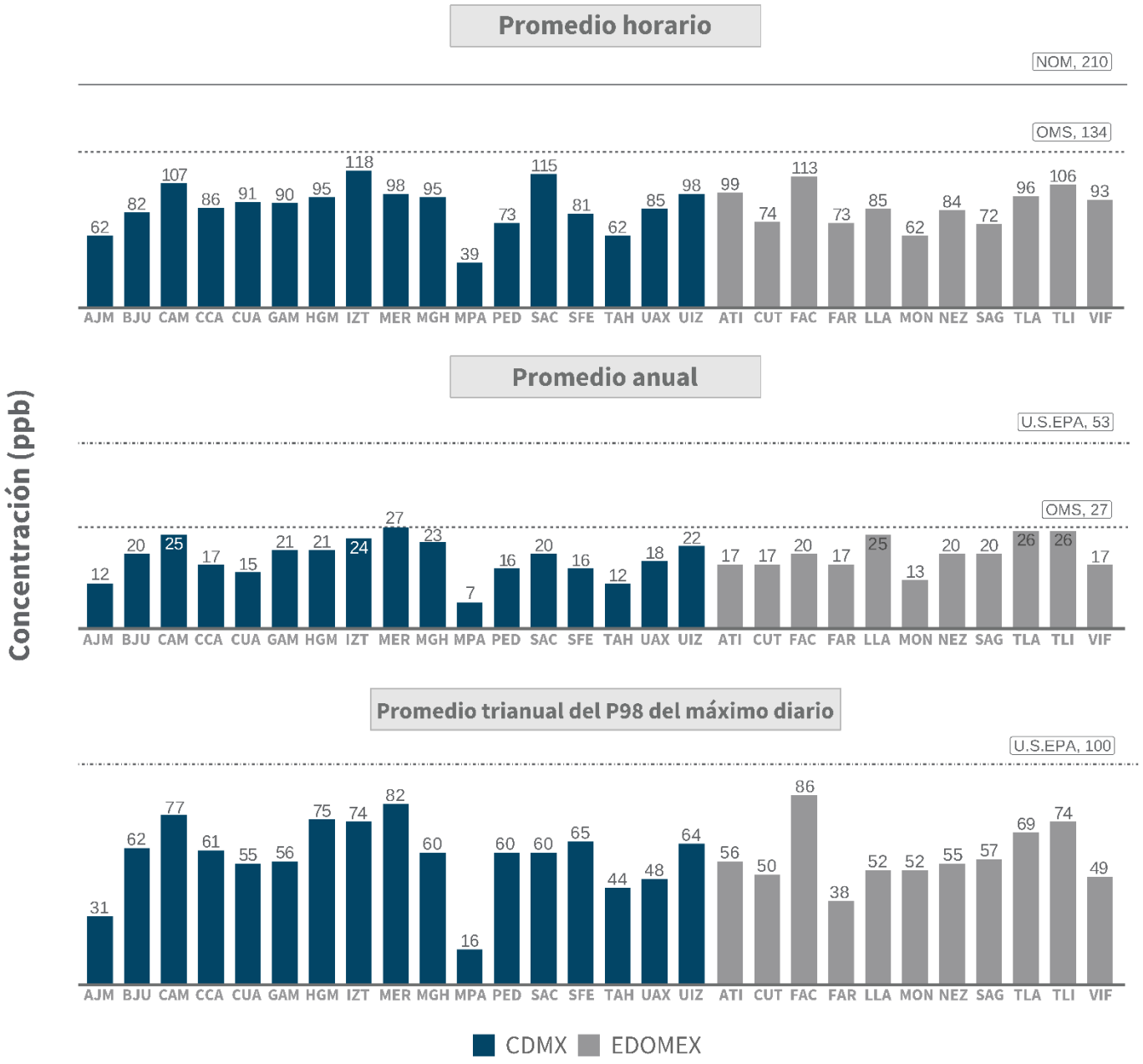


Figura 1.4. Valores de concentración máxima de NO_2 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-1994, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas que se emite a partir de la quema incompleta de combustibles fósiles. El CO tiene efectos importantes en la salud, ya que este contaminante se propaga en los tejidos pulmonares y hacia el torrente sanguíneo, se une a la hemoglobina en la sangre y reduce su capacidad para transportar oxígeno, lo que ocasiona una falta de oxígeno que daña los tejidos, las células y órganos del cuerpo. Los síntomas más comunes derivados de la exposición al contaminante son: dolor de cabeza, dificultad para respirar, confusión, fatiga y mareos debido al suministro inadecuado de oxígeno al cerebro. Los niveles muy altos de CO pueden ser mortales (OMS, 2021).

Los grupos más susceptibles al CO son los bebés por nacer, adultos mayores, así como las personas con padecimientos como anemia y con antecedentes de enfermedades cardíacas o respiratorias. Se ha encontrado evidencia de que las madres que, durante su embarazo, se exponen a niveles altos de CO tienen un mayor riesgo de que su bebé sufra efectos adversos en el desarrollo. Las personas con enfermedades cardiovasculares también son un grupo en riesgo ya que el CO puede reducir, aún más, la capacidad ya comprometida de su cuerpo para responder a las mayores demandas de oxígeno durante el ejercicio, el esfuerzo físico o el estrés. En consecuencia, el suministro inadecuado de oxígeno al músculo cardíaco provoca dolor en el pecho y disminución de la tolerancia en actividad física (CARB, 2023). En los adultos mayores, se ha encontrado una asociación con los ingresos por cinco categorías de padecimientos del corazón: enfermedad cardiovascular total, todas las enfermedades cardíacas, insuficiencia cardíaca, cardiopatía isquémica e infarto de miocardio (Barnett, et al., 2006).

En las revisiones sistemáticas de la OMS en 2021, se determinó que hay una relación de la concentración promedio de CO (24 horas) con los ingresos hospitalarios y las visitas a la sala de emergencias ocasionadas por un infarto de miocardio. Sin embargo, en la mayoría de los estudios revisados y de acuerdo con Lee et al. (2020), se encontró que los niveles de CO ambiental son bajos, con una concentración mínima reportada debajo de 0.5 mg/m^3 (0.44 ppm, 25°C, 1 atm) y la media fue de 0.35 mg/m^3 a 4.56 mg/m^3 (0.31 a 3.98 ppm, 25°C, 1 atm).

Es importante mencionar que los niveles de CO en interiores pueden ser considerablemente más altos que en exteriores ya que hay diversas fuentes potenciales de CO en interiores como las estufas de gas, calefactores, chimeneas, humo de tabaco, gases del escape de automóviles dentro de cocheras y los aparatos de gas que funcionan mal o tienen ventilación inadecuada como los calentadores de agua, hornos y secadoras de ropa (CARB, 2023).

Evaluación de la NOM

EL CO tiene estándares de calidad del aire a nivel mundial debido a sus efectos dañinos en la salud. En México, la normatividad que regula este contaminante es la NOM-021-SSA1-1994, la cual establece el límite permisible de 11 ppm para la concentración máxima del promedio móvil de 8 horas. En la ZMCM, la concentración del CO ha cumplido con el valor límite de la NOM-021-SSA1-1994 desde 2001. En la **Figura 1.5** se presenta la serie de tiempo para el límite de la NOM de CO desde 1988 hasta 2020 y se observa que la reducción del CO ha sido constante a través de los años. Al igual que NO_2, la disminución de CO está relacionada con el desarrollo e implementación de estrategias dirigidas a la regulación las fuentes móviles, las cuales representan casi el 95% del CO total emitido al ambiente (SEDEMA, 2021)

En 2020, ambas entidades y todas las estaciones de la ZMCM cumplieron con los límites de la NOM, OMS y U.S. EPA, el máximo del móvil de 8 h fue 2.5 ppm en la estación Santiago Acahualtepec (SAC) para la CDMX y en el EDOMEX fue de 2.2 ppm en La Presa (LPR). El máximo del indicador horario (OMS y U.S. EPA) se presentó en SAC con 4.0 ppm en CDMX y en Nezahualcóyotl (NEZ) con 4.6 ppm en el EDOMEX (**Tabla 1.5** y **Figura 1.6**)

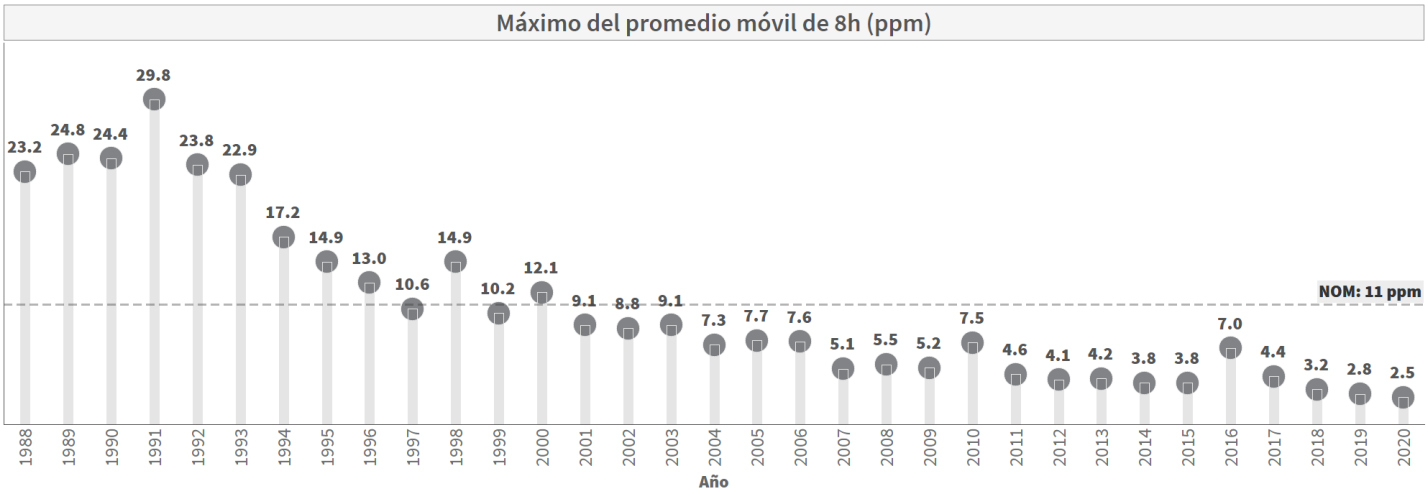


Figura 1.5. Concentración máxima del promedio móvil de 8 horas de CO desde 1988 al 2020.

Tabla 1.5. Valores de concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-1994, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM	OMS		U.S. EPA	
	Promedio móvil 8h	Promedio 1 h*	Promedio móvil 8h*	Promedio 1 h	Promedio móvil 8h
	11 ppm	30 000 µg/m³	10 000 µg/m³	35 ppm	9 ppm
ZMCM	2.5 ppm	4,166 µg/m³	2,264 µg/m³	4.6 ppm	2.5 ppm
CDMX	2.5 ppm	3,622 µg/m³	2,264 µg/m³	4.0 ppm	2.5 ppm
EDOMEX	2.2 ppm	4,166 µg/m³	1,992 µg/m³	4.6 ppm	2.2 ppm

*Conversión a una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

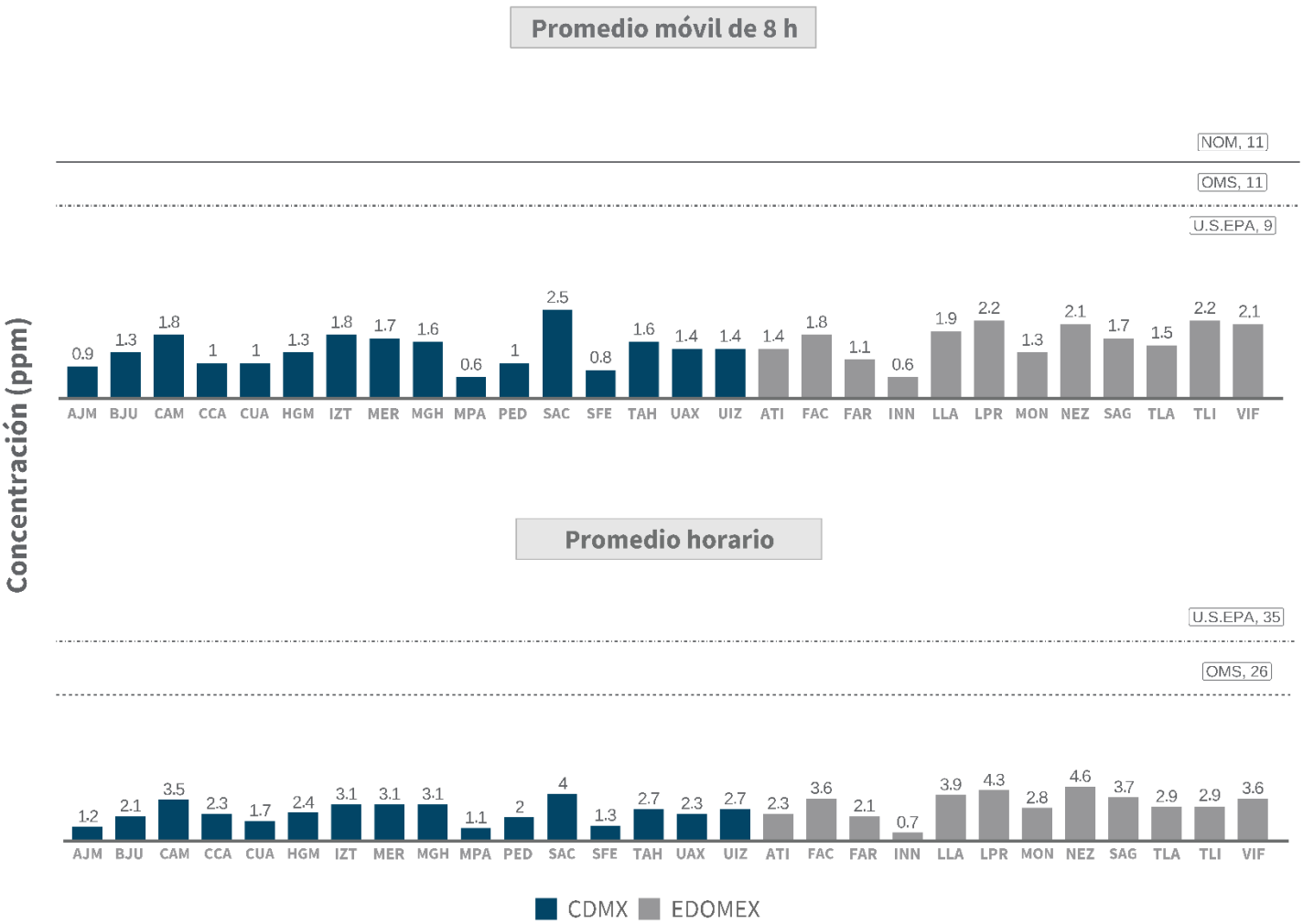


Figura 1.6. Valores de concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-1994, OMS (convertido a ppm con 17°C, 585 mmHg) y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo.

OZONO (O_3)

El ozono troposférico[1] (O_3) es un contaminante secundario, es decir, se genera a partir de otros gases presentes en el ambiente que son los óxidos de nitrógeno (NOx) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

El O_3 es uno de los contaminantes con mayor importancia y atención a nivel mundial, debido a que tiene efectos adversos en el ambiente y en la salud humana. Existen grupos de población que son más susceptibles al O_3, como son los adultos mayores, niños, embarazadas, personas que trabajan o se ejercitan en exteriores, así como aquellas que padecen enfermedades respiratorias (U.S. EPA, 2022).

Existe una cantidad considerable de estudios que aportan evidencia sobre los efectos de la exposición a ozono a corto y largo plazo. Los efectos a **corto plazo** son principalmente problemas respiratorios (OMS, 2005; 2021), los más comunes son:

- Dificultad para respirar, sibilancias y tos.
- Incremento en la frecuencia de ataques de asma (Li et al., 2019).
- Mayor riesgo de infecciones respiratorias y susceptibilidad a la inflamación pulmonar.
- Aumento de visitas a hospitales para las personas con padecimientos pulmonares, EPOC y asma (Kim et al., 2020).

La exposición al O_3 en el **largo plazo** puede aumentar el riesgo de muerte prematura por enfermedades respiratorias, además las investigaciones recientes proporcionan evidencia sobre más efectos de la exposición crónica entre los que se encuentran:

- Aumento de hospitalizaciones por enfermedades respiratorias preexistentes como asma infantil (Li, et al. 2019; Atkinson et al., 2022).
- Puede causar daños reproductivos y de desarrollo, como bajo peso al nacer y disminución de la función pulmonar en recién nacidos (Rappazzo, et al., 2021).
- Incremento del riesgo de trastornos metabólicos como intolerancia a la glucosa, hiperglucemia y diabetes (Yu, et al., 2023).
- Afectación del sistema nervioso central
- Puede causar daños cardiovasculares como ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares, enfermedades e insuficiencia cardíaca (U.S. EPA, 2013).
- Aumenta la respuesta a los alérgenos en personas con rinitis alérgica, también ocasiona mayor sensibilidad a los alérgenos exteriores (Kim et al, 2011).
- Respirar O_3 en combinación con SO_2 y NOx, puede ocasionar que los pulmones reaccionen con más fuerza que sólo respirar O_3. (*American Lung Association*, 2023).

[1]Existen dos tipos de ozono. El O_3 troposférico se forma en la capa más cercana a la superficie, la tropósfera, es dañino para la salud y es producto de reacciones químicas que involucran COV, NOx y luz solar. El O_3 estratosférico, se encuentra a una mayor altura, no tiene efectos adversos en la salud y forma la "capa de ozono", la cual filtra los rayos UV dañinos.

- Los adultos mayores enfrentan un mayor riesgo de muerte prematura incluso a niveles menores al estándar de la U.S. EPA (Di et al., 2017).

Evaluación de la NOM

Debido a los efectos en salud, a corto y largo plazo, el O_3 tiene diversos estándares a nivel mundial. En México, la normatividad que regula este contaminante es la NOM-020-SSA1-2014, la cual establece el límite permisible de 70 ppb para la concentración máxima del promedio móvil de 8 horas y el límite para el máximo horario de 95 ppb, el cual no debe ser rebasado en el año. En la ZMCM, el O_3 es uno de los contaminantes que es una problemática ambiental y en salud, ya que su concentración continúa excediendo ambos límites normados. En la **Figura 1.7** se presenta la serie de tiempo para el cumplimiento de la NOM desde 1988 hasta 2020 y se observa que una reducción notable en el número de horas mayores a 95 ppb, así como en el máximo del promedio móvil de 8 horas; sin embargo, en los últimos años, la tendencia ya se mantiene constante. En 2020, la concentración de los contaminantes disminuyó debido a la pandemia de COVID-19, pero esto tuvo un reducido efecto en cuanto al cumplimiento de la NOM de O_3 durante 2020, ya que el número de horas en las que se superó el límite de 95 ppb fue similar al 2019 y 2017. Mientras que, en el máximo del móvil de 8 h, el valor de 2020 registró el mínimo de todos los años y fue cercano al observado en 2018.

En la **Tabla 1.6** se observa que, durante 2020, ambas entidades que conforman la ZMCM superaron los límites normados a nivel nacional e internacional. La CDMX presentó los valores más altos y el mayor número de horas que rebasan el límite, esto es ocasionado por el transporte del contaminante y sus precursores, así como los patrones de viento y las montañas que rodean a la CDMX, lo que conlleva a que los máximos normalmente se presenten al sur de la ZMCM.

En la **Figura 1.8** se presentan los indicadores nacionales e internacionales por estación de monitoreo, el máximo de número de horas (O_3 > 95 ppb) fue en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con 355 horas para la CDMX, mientras que en el EDOMEX fue de 147 horas en el sitio FES Aragón (FAR). En la concentración máxima del móvil de 8h, la estación Santa Fe (SFE) registró el valor más alto con 117 ppb en la CDMX y en el EDOMEX fue 107 ppb en Cuautitlán (CUT). En el indicador de la U.S. EPA, el máximo de CDMX se registró en Pedregal (PED) con 116 ppb; mientras que, para EDOMEX fue en FAR con 109 ppb.

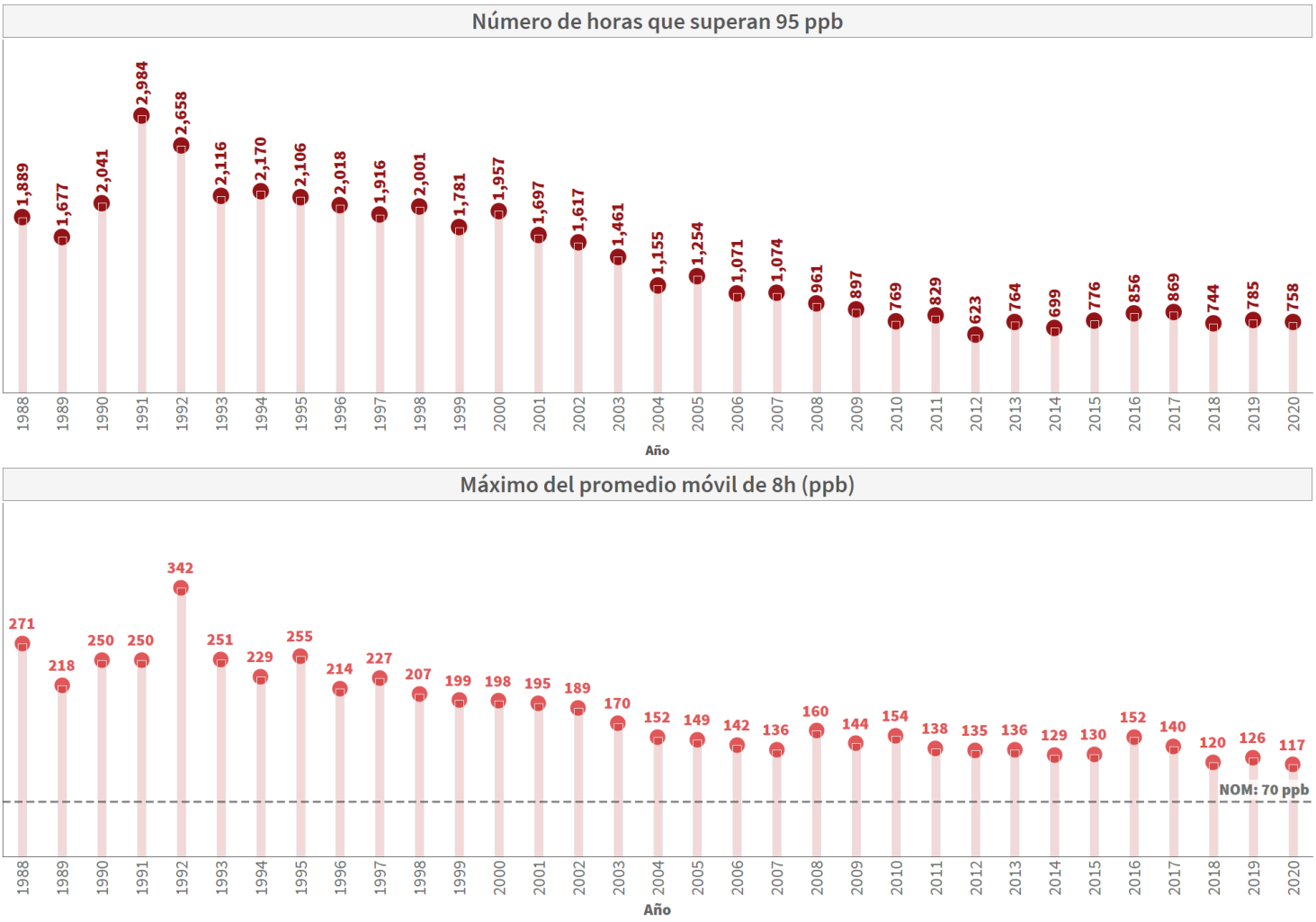


Figura 1.7. Número de horas superiores a 95 ppb (arriba) y concentración máxima del promedio móvil de 8 horas (abajo) de O_3 desde 1988 al 2020.

Tabla 1.6. Valores de concentración máxima de O_3 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2014, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS	U.S. EPA
	Número de horas máximo 1 h	Promedio móvil 8 h	Promedio móvil 8 h*	Promedio trianual del 4to máx. del móvil 8h
	95 ppb	70 ppb	100 µg/m³	70 ppb
ZMCM	758 horas	117 ppb	182 $\mu g/m^3$	116 ppb
CDMX	712 horas	117 ppb	182 $\mu g/m^3$	116 ppb
EDOMEX	301 horas	107 ppb	166 $\mu g/m^3$	109 ppb

*Conversión a una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

No cumple con los valores límite

La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

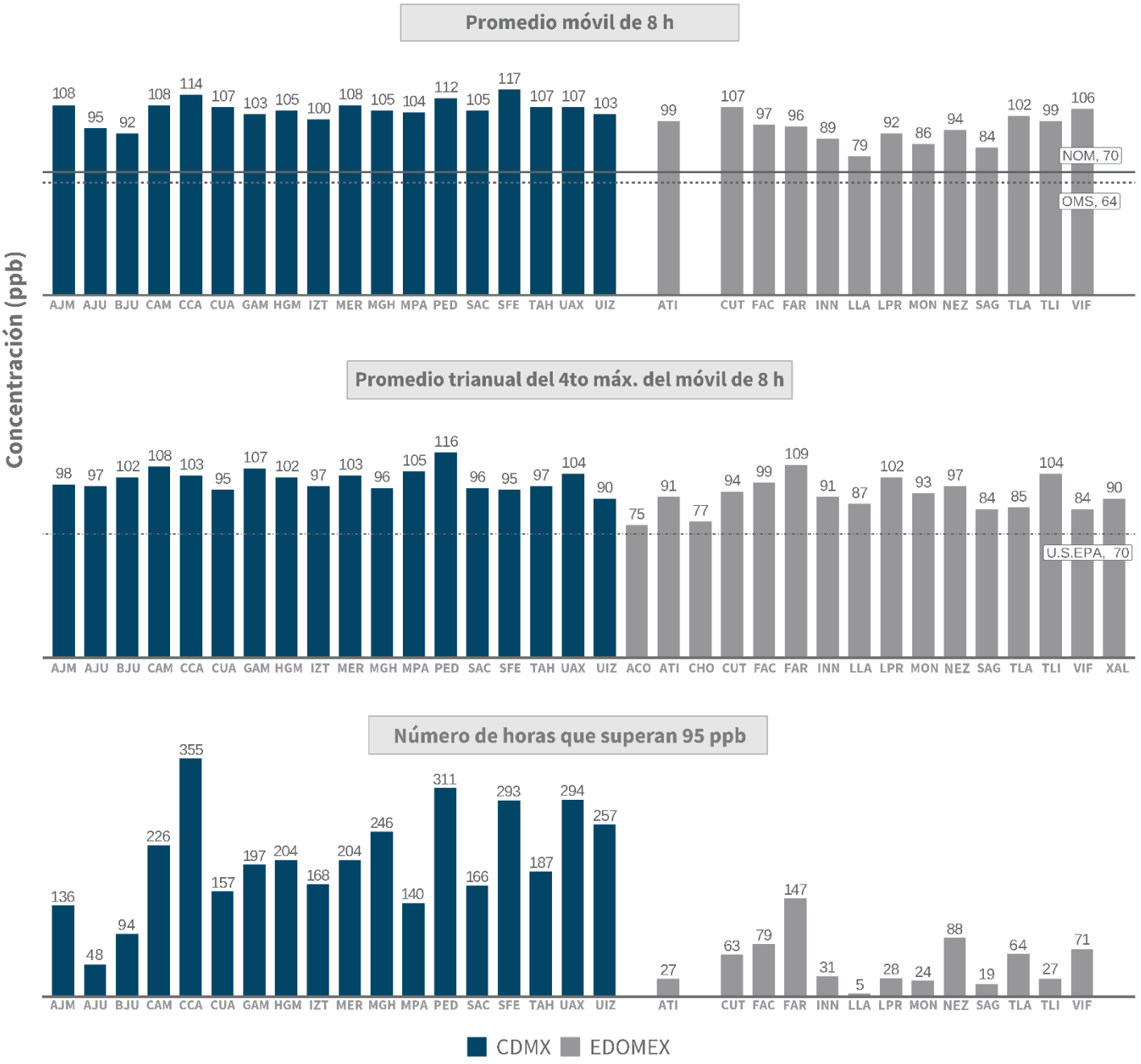


Figura 1.8. Valores de concentración máxima de O_3 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2014, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo.

PARTÍCULAS MENORES A 10 µm (PM_{10})

Las partículas suspendidas en el aire (PM) son una mezcla de diversas especies químicas. Las partículas varían en tamaño, forma y composición química (iones inorgánicos, metales, carbono elemental, compuestos orgánicos, minerales). En términos de la regulación de calidad del aire, las partículas se definen por su diámetro ya que su tamaño está directamente relacionado con su potencial para causar efectos en salud. Las partículas pequeñas, con menos de 10 y 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{10} y $PM_{2.5}$) representan una mayor problemática porque pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio e incluso llegar al torrente sanguíneo (U.S. EPA, 2022).

Se han realizado numerosos estudios para analizar los efectos en salud de la exposición a partículas. En el caso de PM_{10} se ha encontrado que es más probable que este tamaño de partículas se deposite en la superficie de las vías respiratorias y del pulmón. Las partículas depositadas en la superficie pulmonar pueden inducir daño tisular e inflamación. Las personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, los niños y los adultos mayores son los más susceptibles a la exposición de partículas (CARB, 2023).

La exposición de **corto plazo** a PM_{10} se ha relacionado principalmente con el empeoramiento de las enfermedades respiratorias, como el asma y el EPOC, así como disminución de la función pulmonar, irritación de las vías respiratorias, tos y disnea, esto incrementa hospitalizaciones y visitas al departamento de emergencias. Las PM_{10} también se han asociado a mortalidad por causas respiratorias, cerebrovasculares y cardiovasculares (Orellano et al., 2020; OMS, 2021). En el estudio de Liu et al. (2019), se analizaron 652 ciudades, que incluyó zonas de México, y se determinó que un aumento de 10 µg/m^3 en el promedio móvil de 2 días de la concentración de PM_{10} (promedio del día actual y el anterior) está asociado con aumentos en mortalidad diaria por cualquier causa, así como en mortalidad cardiovascular y respiratoria.

En los efectos a **largo plazo**, los estudios sugieren un vínculo entre las PM_{10} y la mortalidad respiratoria. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) concluyó que las partículas en la contaminación del aire exterior pueden causar cáncer de pulmón (IARC, 2015). Algunos estudios que sugieren que la exposición a largo plazo a las PM_{10} relacionadas con el tránsito vehicular, puede desencadenar cambios adversos en la regulación del sistema cardiovascular, incluso en personas sin enfermedad cardiovascular preexistente (Meier-Girard et al., 2019).

Evaluación de la NOM

Las PM_{10} están reguladas a nivel internacional por la cantidad de efectos en salud y en México, los valores límites de las PM están reguladas por la NOM-025-SSA1-2014, la cual tiene dos indicadores para las PM_{10}, el máximo del promedio de 24 horas no debe superar 75 µg/m^3 y el promedio anual tiene un límite de 40 µg/m^3. En la ZMCM, las partículas suspendidas han constituido unos de los problemas ambientales más relevantes, ya que durante la temporada seca fría (noviembre a febrero), tolvaneras, el uso de pirotecnia y en eventos de incendios, se alcanzan valores altos y extremos de este contaminante, por lo que aún se superan los límites normados.

En la **Figura 1.9** se presenta la serie de tiempo de los indicadores de la NOM para PM_{10} desde 1989 a 2020 y se observa que se ha logrado una reducción importante a través de los años; sin embargo, no ha sido constante. Durante 2020, se alcanzaron los valores mínimos en ambos indicadores de PM_{10}, pero es importante señalar que en este año se presentaron factores que influyeron en la reducción de la concentración de PM_{10}, como la pandemia COVID-19 y la disminución en la cantidad de datos, consecuencia de las restricciones de acceso a los edificios donde las estaciones están ubicadas y por lo tanto, estuvieron fuera de operación (**Anexo III**), como fue el caso de Xalostoc (XAL). Históricamente XAL ha presentado los valores más altos de partículas; sin embargo, en 2020 estuvo fuera de operación la mayor parte del año, por lo que no cumplió con la suficiencia de datos establecida en la NOM para su evaluación de cumplimiento, por lo que dicha estación y otras, se descartaron en este análisis, pero los datos completos se encuentran disponibles en el **Anexo IV** de este informe

En la **Tabla 1.7** se observa que, durante 2020, ambas entidades que conforman la ZMCM superaron los límites establecidos en la NOM y en la OMS, donde el EDOMEX presentó los valores más altos en todos los indicadores, esto debido a que los máximos normalmente se registran al norte de la ZMCM, por las fuentes móviles y fijas en la región. El límite del estándar de la U.S. EPA para PM_{10} se cumplió ambas entidades de la ZMCM. A nivel estación (**Figura 1.10**), el máximo promedio de 24 h (NOM) se registró en MER con 82 µg/m^3 para la CDMX y para EDOMEX fue en LPR con 113 µg/m^3. En el indicador anual (NOM y OMS), los valores más altos se registraron en las mismas estaciones MER y LPR con 42 µg/m^3 y 50 µg/m^3, respectivamente. Se observó que la estación PED fue la única que cumplió con ambos límites establecidos en la NOM. Para el indicador de la OMS, el máximo de CDMX también se registró en MER (82 µg/m^3) y el de EDOMEX en LPR (113 µg/m^3); mientras que para el promedio trianual de la U.S. EPA, todas las estaciones cumplieron el límite; con los máximos en MER (80 µg/m^3) de CDMX y XAL (117 µg/m^3) en EDOMEX.

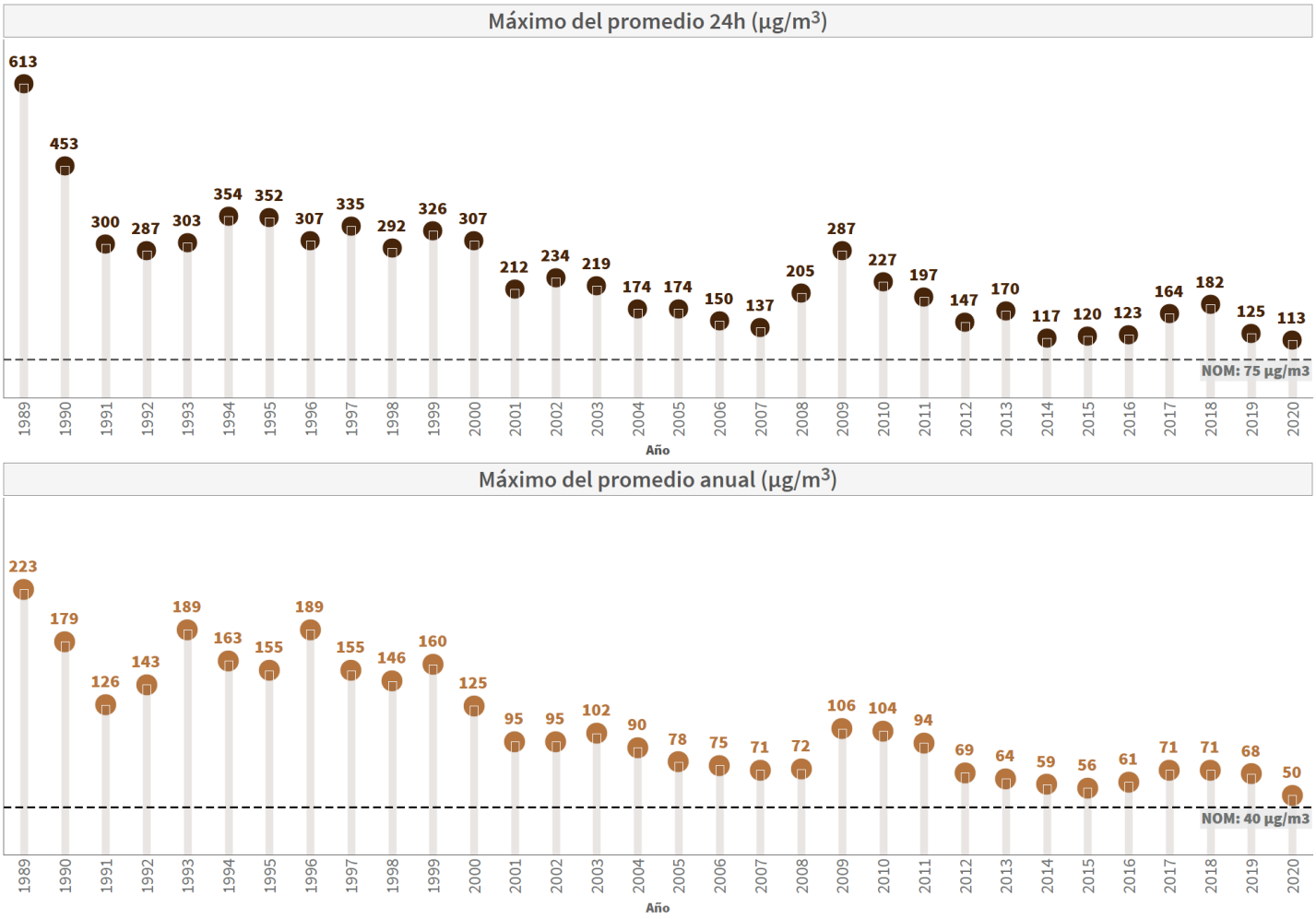


Figura 1.9. Máximo del promedio de 24 horas (arriba) y concentración máxima anual (abajo) de PM_{10} desde 1989 al 2020.

Tabla 1.7. Valores de concentración máxima de PM_{10} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2014, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA
	Promedio de 24 h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2do máx. de 24h
	75 µg/m³	40 µg/m³	50 µg/m³	20 µg/m³	150 µg/m³
ZMCM	113 µg/m³	50 µg/m³	113 µg/m³	50 µg/m³	117 µg/m³
CDMX	82 µg/m³	42 µg/m³	82 µg/m³	42 µg/m³	80 µg/m³
EDOMEX	113 µg/m³	50 µg/m³	113 µg/m³	50 µg/m³	117 µg/m³

No cumple con los valores límite
La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

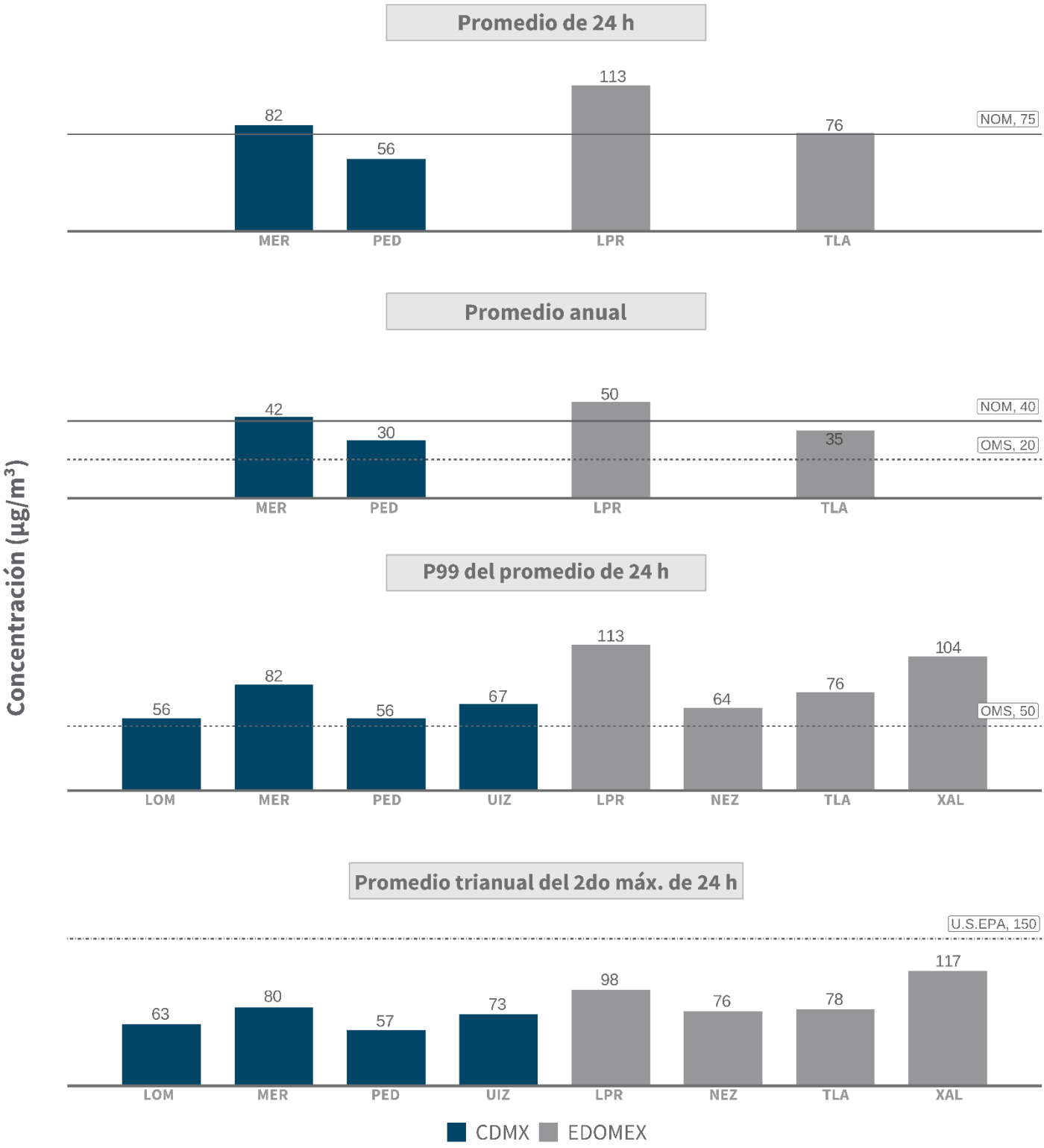


Figura 1.10. Valores de concentración máxima de PM_{10} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo.

PARTÍCULAS MENORES A 2.5 µm ($PM_{2.5}$)

Las partículas finas son aquellas que tienen un diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), por lo tanto, están contenidas dentro de las PM_{10}. Sin embargo, es más probable que las $PM_{2.5}$ se transporten y depositen en las partes más profundas del pulmón debido a su tamaño más pequeño (CARB, 2023). A nivel mundial, se les atribuye 4 millones de muertes por padecimientos cardiopulmonares, cáncer, infecciones respiratorias, enfermedades pulmonares crónicas, partos prematuros y otras enfermedades; debido a esto, las $PM_{2.5}$ son consideradas un peligro para la salud (Bu et al., 2021; Thangavel et al., 2022). De acuerdo con la ISA de la U.S. EPA, las $PM_{2.5}$ y la mortalidad total tienen una relación causal, es decir, son consideradas causa de muerte, así como de consecuencias cardiovasculares y respiratorias graves. Los grupos en mayor riesgo son los niños, adultos mayores, las personas con padecimientos cardiovasculares y respiratorios, con sobrepeso u obesidad y personas fumadoras o exfumadoras (U.S. EPA, 2019).

La exposición a **corto plazo** de $PM_{2.5}$ (24 horas) se ha relacionado con mortalidad prematura, aumento de ingresos hospitalarios por causas cardíacas o pulmonares, bronquitis aguda y crónica, ataques de asma, visitas a emergencias por exacerbación de síntomas respiratorios. En el estudio de Liu et al. (2019) se analizó la concentración de $PM_{2.5}$ en 499 ciudades del mundo, que incluyó 3 regiones de México, se estimó que un incremento de 10 µg/m^3 en el promedio móvil de 2 días de $PM_{2.5}$, puede aumentar la mortalidad total, cardiovascular y respiratoria. De acuerdo con este análisis, México tuvo un aumento del 1.29 % en el riesgo por mortalidad total (Liu et al., 2019).

La exposición a **largo plazo** (meses a años) se ha relacionado con la muerte prematura, particularmente en personas que padecen enfermedades cardíacas o pulmonares crónicas, aumento de la mortalidad por cáncer de pulmón y efectos en el sistema nervioso (U.S. EPA, 2019). También se ha observado un crecimiento reducido en la función pulmonar de los niños; en algunos estudios se analizaron comunidades con niveles altos de $PM_{2.5}$ y se estimó que los niños tenían un crecimiento pulmonar más lento y presentaban pulmones de menor tamaño a los 18 años de edad, en comparación con los que vivían en comunidades con niveles bajos de $PM_{2.5}$ (CARB, 2023; Li et al., 2020; Gauderman et al., 2004). En el caso de los adultos mayores, un estudio realizado en ciudades de Estados Unidos estimó que un incremento de 10 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ aumentaba el riesgo de hospitalización por enfermedad respiratoria y cardiovascular, además fue mayor durante el invierno (Bell et al., 2008). Los principales efectos neurológicos reportados sobre las

$PM_{2.5}$ son el estrés oxidativo, desequilibrio sináptico, agregación de proteínas, apoptosis, cambios morfológicos y en la memoria, cambios hormonales, los cuales pueden conllevar a lesiones en el sistema nervioso central y, en consecuencia, se altera el neurodesarrollo, la anatomía, fisiología y la respuesta inmune, incluso puede derivar en enfermedades neurodegenerativas, así como en el deterioro del comportamiento neurológico (Ferreira et al., 2022; Kang et al, 2021).

Evaluación de la NOM

A nivel mundial se han establecido límites para regular las $PM_{2.5}$ debido a los graves efectos en salud reportados. En México, la NOM-025-SSA1-2014 establece dos valores límite en $PM_{2.5}$, el promedio de 24 horas no debe exceder 45 µg/m^3, mientras que, para el promedio anual el límite son 12 µg/m^3. En la ZMCM, estas partículas finas son unos de los problemas ambientales de mayor importancia y desafío, ya que, similar a PM_{10}, en la temporada seca fría y eventos de incendios como el ocurrido en mayo 2019, las $PM_{2.5}$ alcanzan valores altos y extremos, por lo que aún se superan los límites normados. En la serie de tiempo de los indicadores de la NOM (**Figura 1.11**), se observa que el máximo del promedio 24 horas ha sido variable a través de los años y en el caso del promedio anual, hay una reducción en los primeros años (2004 al 2006); sin embargo, últimamente se ha mantenido constante sin una clara disminución. Durante 2020, se alcanzaron los valores mínimos en ambos indicadores de $PM_{2.5}$, pero al igual que PM_{10}, la pandemia COVID-19 y la cantidad de datos por los sitios fuera de operación (**Anexo III**), influyeron en los valores máximos evaluados. La estación XAL estuvo fuera de operación en 2020, por lo que no tiene suficiencia de datos y en el caso de San Agustín (SAG) tampoco se cumplió con la suficiencia de datos establecida en la NOM (3 trimestres válidos) para la evaluación del cumplimiento, por esta razón, ambos sitios se descartaron en este análisis y sus datos completos se encuentran disponibles en el **Anexo IV** de este informe.

Durante 2020, el límite del promedio de 24 h de la NOM sí se cumplió en ambas entidades de la ZMCM, mientras que el límite del promedio anual fue superado. Los valores para los indicadores OMS y U.S. EPA, fueron excedidos en ambas entidades (**Tabla 1.8**). En el análisis por estación (**Figura 1.12**), el máximo del promedio de 24 h de la CDMX fue en MER y UAM Iztapalapa (UIZ) con 33 µg/m^3 mientras que para EDOMEX fue TLA con 32 µg/m^3. Para el indicador anual (NOM y OMS), los valores más altos fueron en MER (18 µg/m^3) y TLA (19 µg/m^3). En los indicadores de 24 h de la OMS y de la U.S. EPA, sus máximos también se registraron en MER y UIZ para CDMX, así como en XAL para EDOMEX. Por último, en el promedio trianual de la U.S. EPA, el máximo en CDMX fue en MER (21 µg/m^3) y para EDOMEX fue en TLA (22 µg/m^3).

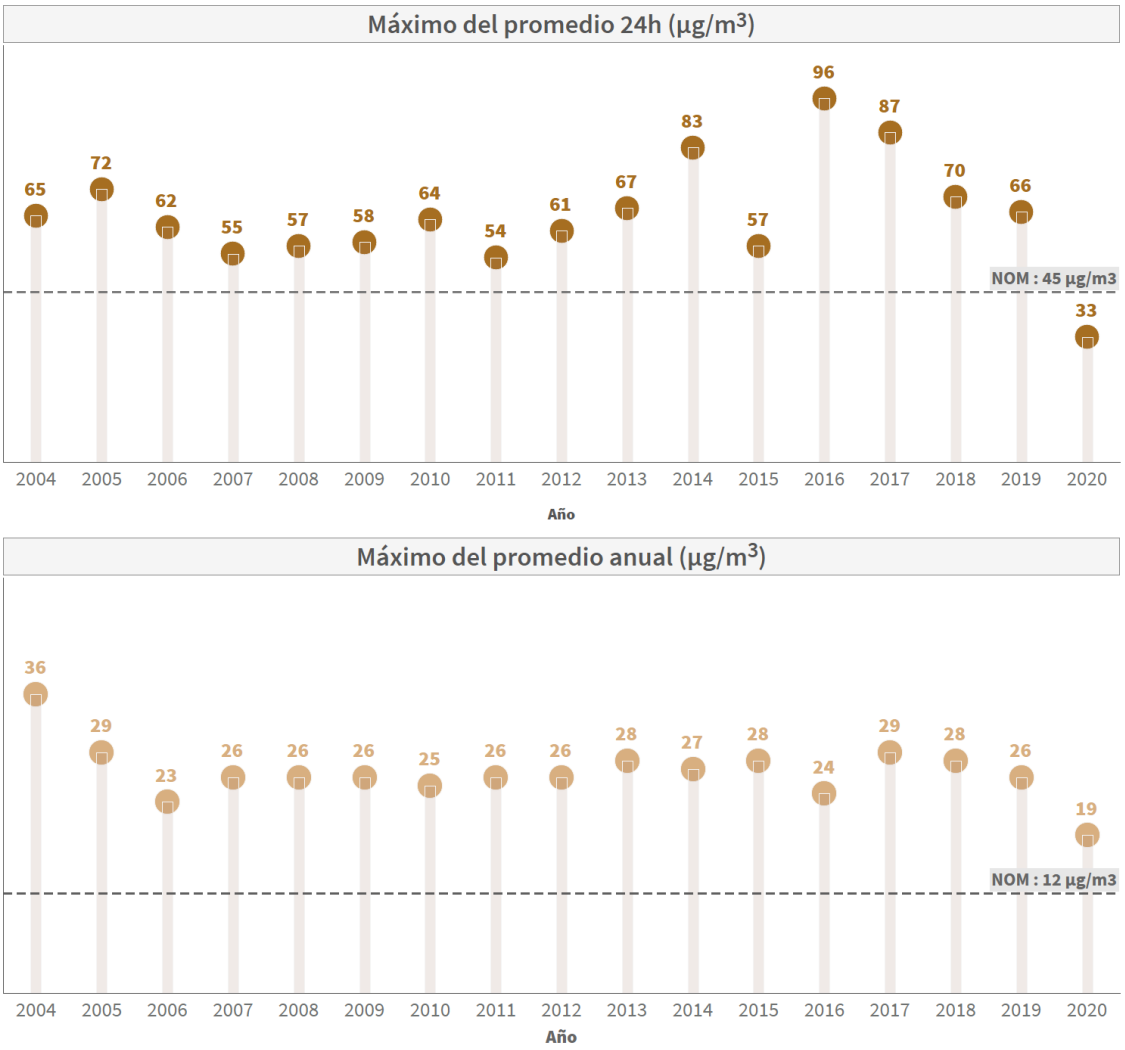


Figura 1.11. Máximo del promedio de 24 horas (arriba) y concentración máxima anual (abajo) de $PM_{2.5}$ del 2004 al 2020.

Tabla 1.8. Valores de concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA	
	Promedio de 24 h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del P98 de 24h	Promedio trianual
	45 µg/m³	12 µg/m³	25 µg/m³	10 µg/m³	35 µg/m³	12 µg/m³
ZMCM	33 µg/m³	19 µg/m³	44 µg/m³	19 µg/m³	49 µg/m³	22 µg/m³
CDMX	33 µg/m³	18 µg/m³	33 µg/m³	18 µg/m³	46 µg/m³	21 µg/m³
EDOMEX	32 µg/m³	19 µg/m³	44 µg/m³	19 µg/m³	49 µg/m³	22 µg/m³

No cumple con los valores límite

La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

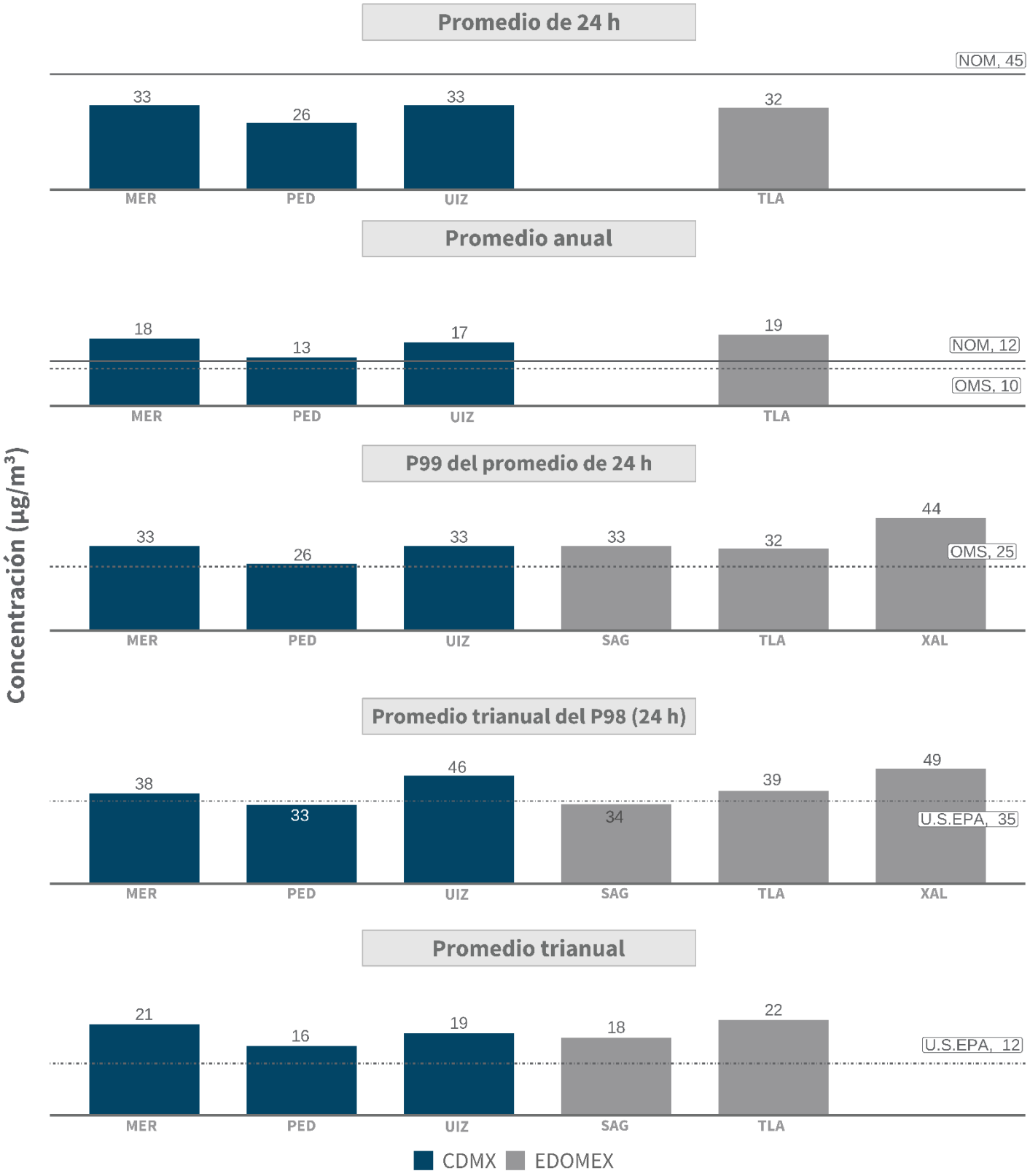
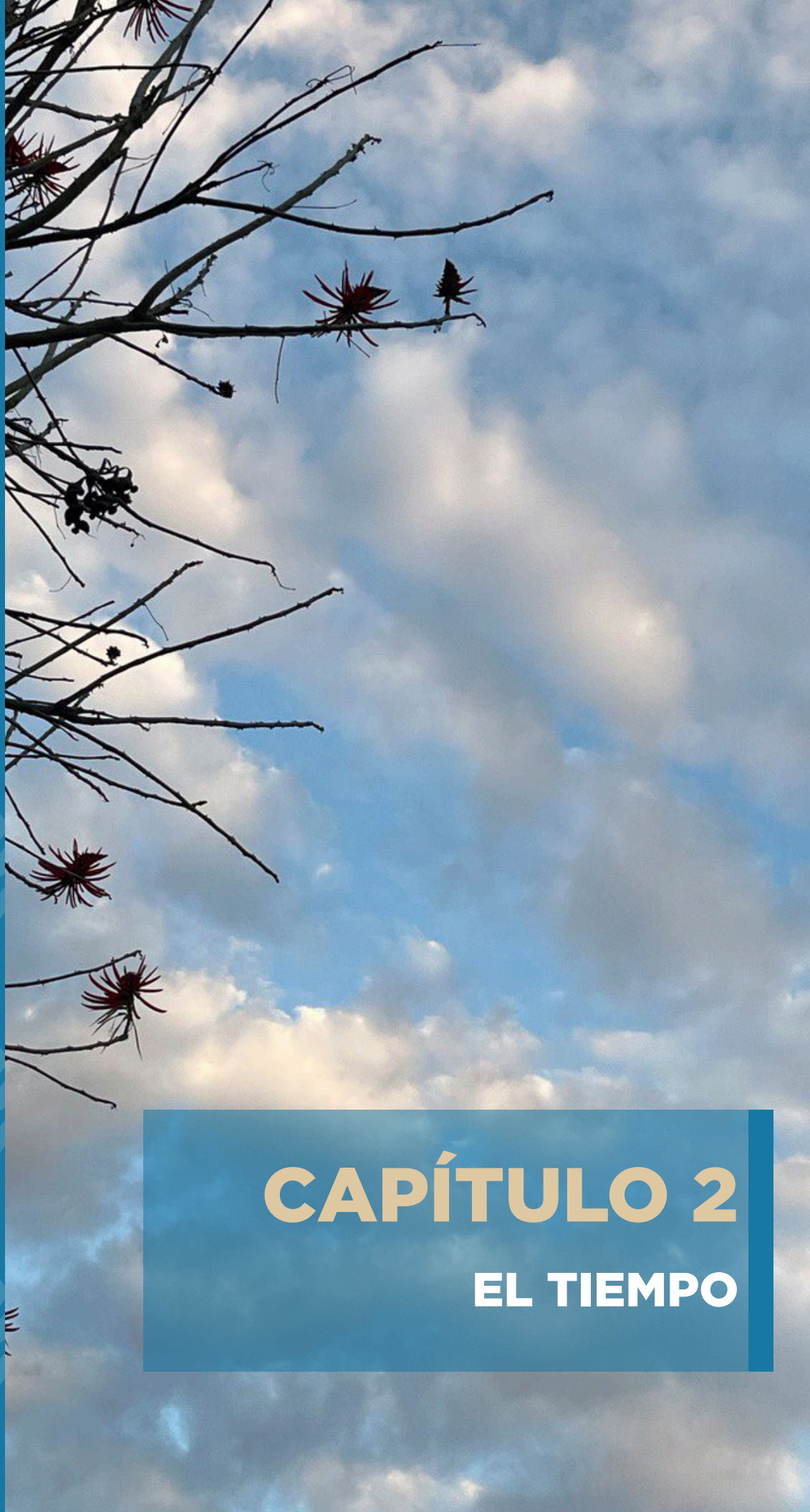


Figura 1.12. Valores de concentración máxima de $PM_{2.5}$ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2014, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA por estación de monitoreo.

INFORME ANUAL
2020



CAPÍTULO 2

EL TIEMPO

TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud física que indica la cantidad de energía térmica de un objeto, de un cuerpo o del medio ambiente en general. Existen varias escalas de medición de temperatura y la más utilizada es la Celsius (°C) (Núñez, 2020). La temperatura de la atmósfera se refiere a la cantidad de energía calorífica acumulada en el aire y depende de varios factores como la inclinación de los rayos del Sol, la dirección y fuerza de los vientos, de la latitud, altitud, entre otros. Esta variable meteorológica es un factor muy importante en la química atmosférica y en la calidad del aire, ya que la temperatura del aire puede influir en la formación y dispersión de contaminantes.

A nivel global, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) indicó que la década 2011 a 2020 fue la más cálida históricamente, esto se determinó con las principales bases de datos de reanálisis en centros de investigación internacionales. Durante 2020, la temperatura promedio en superficie, a nivel mundial, fue superior al promedio observado en el siglo XX en 1.59 °C y fue la más alta del registro.

En México, durante 2020 se reportó una temperatura media de 22.4 °C, que estuvo 1.4 °C por encima de la normal climatológica 1981-2010. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los máximos de temperatura en el país son de junio a septiembre, en la época de verano.

La temperatura media en el verano de 2020 fue 2.6 °C mayor al promedio del periodo 1981-2010 y fue clasificado como el segundo verano más cálido (SMN, 2020).

En los datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) durante 2020, la ZMCM tuvo una temperatura promedio anual de 17 °C (**Figura 2.1a**), lo que fue 0.2 °C menor a la observada en 2019, pero mayor que años anteriores. En abril se registró el promedio mensual máximo, con 19.7 °C, mientras que el mínimo se presentó en enero con 13.8 °C (**Figura 2.1b**).

La temperatura horaria mínima registrada fue de -4.7 °C y ocurrió el 28 de diciembre a las 07:00 h en la estación Ajusco (AJU), este valor se asoció al frente frío No. 23, el cual se desplazó en el territorio nacional del 23 al 26 de diciembre de 2020 y la masa de aire fría de origen polar asociada a este frente, influyó hasta el día 28 sobre el noreste, oriente y centro del país. La temperatura horaria máxima se registró el 26 de marzo con 33 °C a las 15:00 h en FES Acatlán (FAC).

En el perfil horario de temperatura durante 2020 (**Figura 2.1c**), se observó que el mínimo ocurrió entre las 06:00 y 08:00 h, mientras que los valores más altos se registraron entre las 14:00 y las 16:00 h.

La distribución espacial de la temperatura (**Figura 2.1d**) muestra que las estaciones de la periferia reportaron los valores mínimos, por el contrario, los sitios en el centro de la zona metropolitana tuvieron valores más altos, ya que están influenciadas por los materiales de construcción de las edificaciones y suelo, los cuales absorben más calor que luego transfieren al aire alrededor. Las estaciones con el promedio máximo anual fueron Miguel Hidalgo (MGH) y San Agustín (SAG) con 19 °C, mientras que el mínimo fue en AJU con 9.9 °C, ubicada al sur de la CDMX, en las montañas del Ajusco-Chichinautzin.

La serie de tiempo de temperatura en la ZMCM en el periodo 1986-2020 (**Figura 2.2**) presenta una tendencia creciente en las últimas décadas, conforme al aumento de temperatura en todo el país y a la tendencia global.

En un análisis de anomalías de temperatura en la ZMCM (**Figura 2.3**), se observaron valores por encima del promedio (2000-2019) en todos los meses del año, con febrero, marzo y abril como los que presentaron las anomalías positivas más altas con 1.4, 1.8 y 1.9 °C, respectivamente.

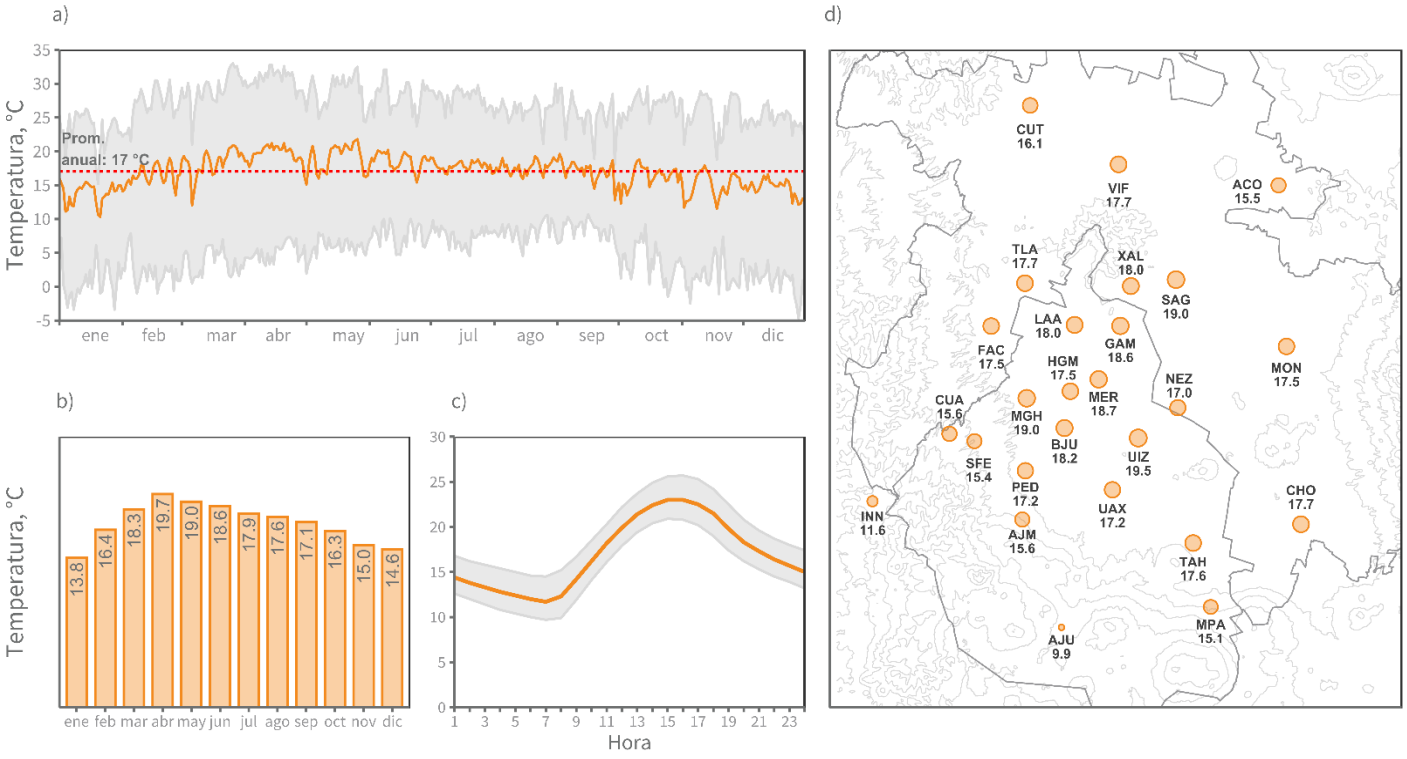


Figura 2.1. Comportamiento de la temperatura ambiente en 2020. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea naranja continua), máximo y mínimo (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea naranja es el promedio en cada hora y el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual de temperatura (°C) por estación.

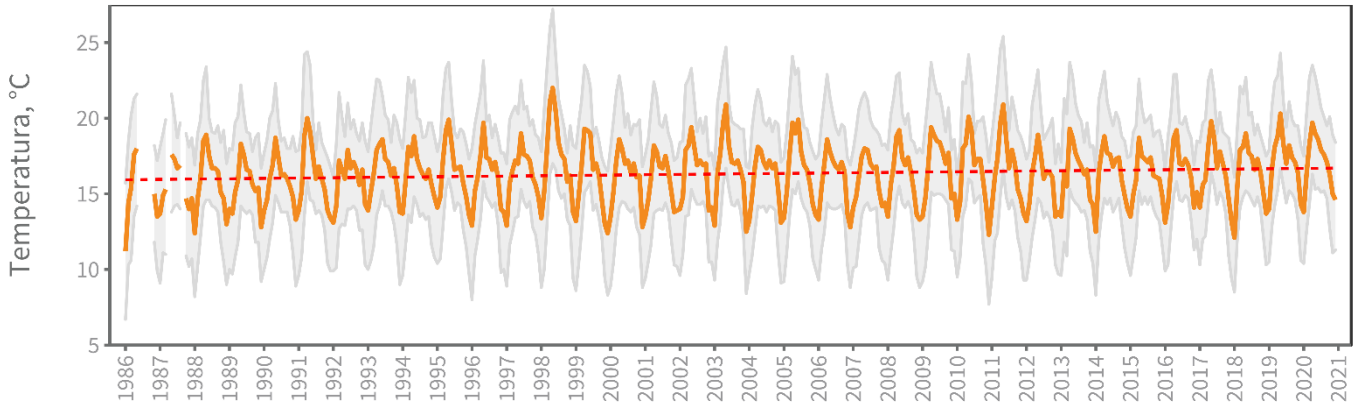


Figura 2.2. Serie de tiempo de temperatura en la ZMCM (1986-2020). La línea naranja continua es el promedio mensual con todas las estaciones de REDMET. La línea roja discontinua es la tendencia en el periodo analizado.

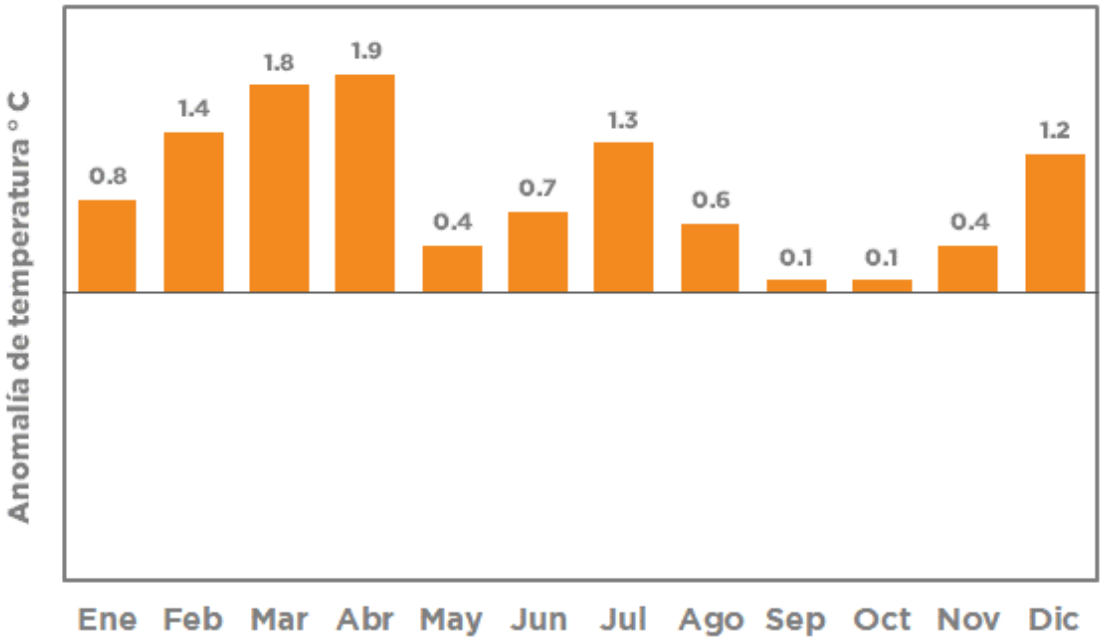


Figura 2.3. Anomalías mensuales de temperatura en la ZMCM durante 2020, calculada respecto al promedio de 2000-2019, se usaron las estaciones MER, PED, FAC y XAL, debido a la suficiencia de datos.

HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa del ambiente es la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera. La unidad de medida es en porcentaje y puede oscilar entre el 0 %, cuando el aire se encuentra completamente seco (p.ej. en desiertos), y el 100 % cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua y hay lluvias (Briceño, 2018).

La distribución anual de la humedad relativa en México está relacionada con los periodos de lluvia, ya que los máximos se observan de junio a octubre, con el mayor porcentaje en septiembre. Por el contrario, desde noviembre se observa un descenso de los valores hasta abril y este último es el mes con menos humedad relativa (SMN, 2020).

En el 2020 se registró un promedio anual de 52.4 % en la ZMCM (**Figura 2.4a**), este valor fue menor en 1.1 % al registrado en 2019. Durante el periodo de febrero a mayo se reportaron los promedios mensuales más bajos, con marzo y abril con los valores mínimos del 42 y 43 %, respectivamente. Los datos de humedad relativa más altos se registraron de junio a septiembre, con los máximos en agosto con 66 % y septiembre, con 67 % (**Figura 2.4b**).

En el perfil horario de la humedad relativa (**Figura 2.4c**), se observa que los máximos ocurrieron entre las 06:00 y 08:00 h, mientras que los mínimos se registraron entre las 14:00 y 16:00 h, lo cual corresponde con el comportamiento climático.

En la distribución espacial de humedad relativa (**Figura 2.4d**), se observa que las estaciones localizadas en la periferia reportaron los valores más altos con el máximo en Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 66 %, dicha estación se encuentra en una región boscosa al suroeste de la ZMCM, en el municipio Ocoyoacac, Estado de México. Los sitios en el interior de la zona urbana fueron los que reportaron los valores más bajos, los mínimos se registraron en Hospital General de México (HGM) y Miguel Hidalgo (MGH) con 45.4 y 45.5 %, respectivamente.

En la **Figura 2.5** se presenta el cálculo de las anomalías de humedad relativa con respecto al promedio del período 2000-2019 y se observaron anomalías negativas en todo el año, es decir, durante 2020 la humedad en la ZMCM fue inferior a la del período 2000-2019, esto es congruente con el déficit de precipitación reportado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX); con estos datos, la Ciudad de México se clasificó entre los 10 estados más secos del país durante este año.

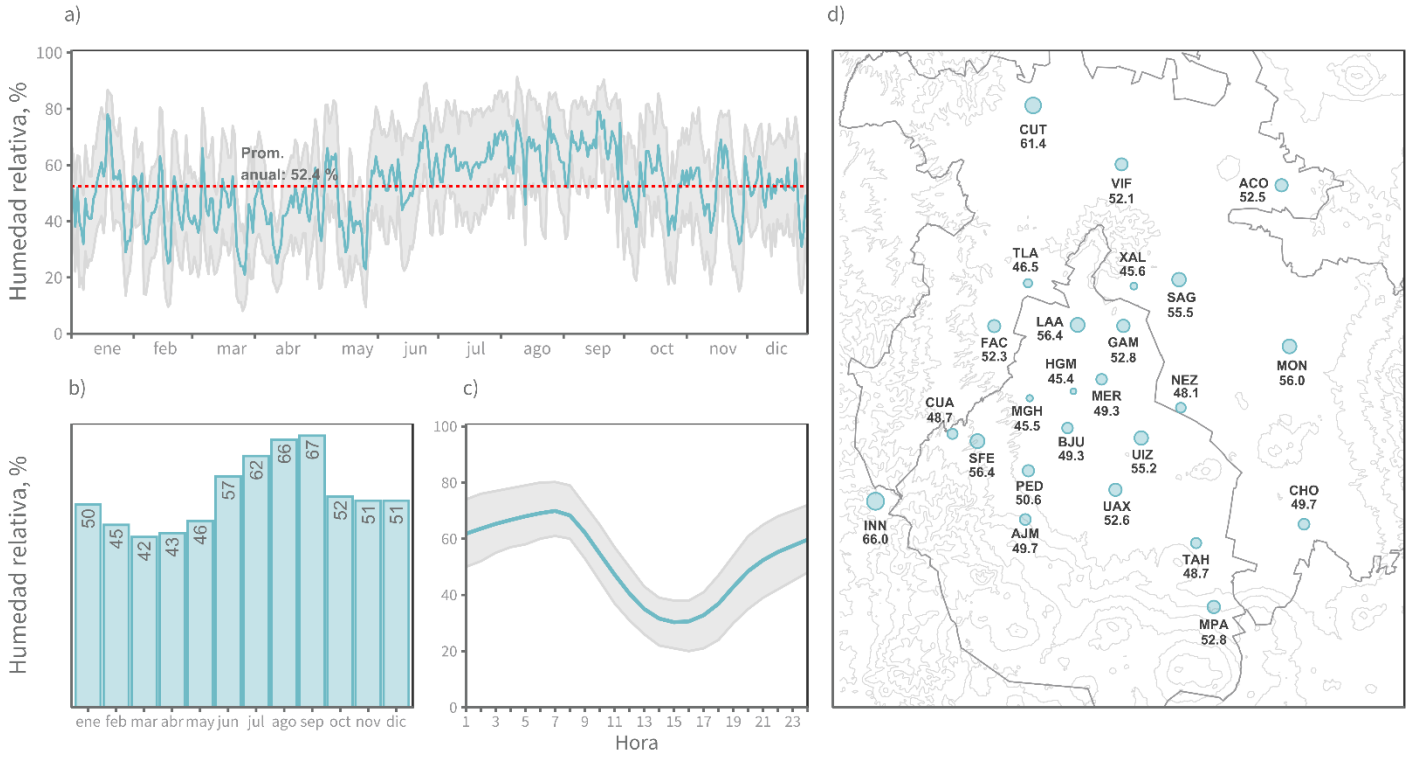


Figura 2.4. Comportamiento de la humedad relativa en 2020. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea azul continua), desviación estándar (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea azul es el promedio en cada hora y el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual de la humedad relativa (%) por estación.

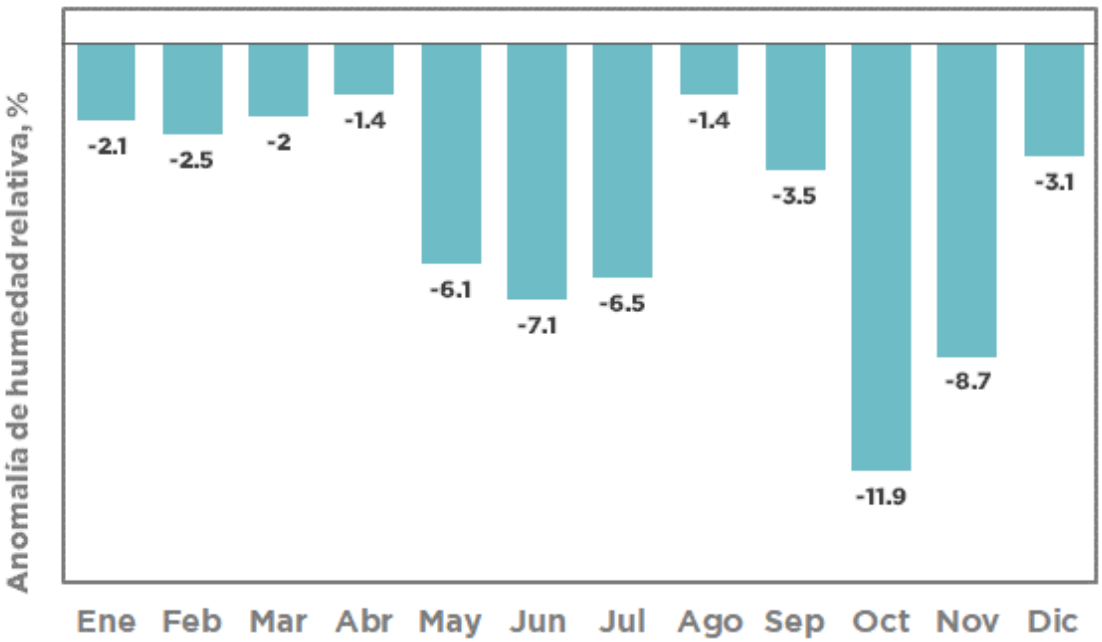


Figura 2.5. Anomalías mensuales de la humedad relativa en la ZMCM durante 2020, calculada respecto al promedio de 2000-2019, se usaron las estaciones MER, TLA, FAC y XAL, debido a la suficiencia de datos.

PRECIPITACIÓN

La precipitación es la caída del agua contenida en la atmósfera hasta la superficie terrestre. Puede ser en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo. La cantidad de precipitación sobre un lugar determinado se mide en pluviómetros y la unidad de medida es en milímetros (Pérez, 2020). La precipitación es un factor importante en la disminución de contaminación, debido al lavado atmosférico; sin embargo, al mezclarse con algunos contaminantes, puede formarse lluvia ácida, este fenómeno se explica en el **Capítulo 5** de este informe.

El régimen de precipitación en la región central mexicana durante el año se puede dividir en dos periodos: el lluvioso, el cual ocurre de mayo a octubre; y el poco lluvioso que es de noviembre al mes de abril. El acumulado anual de precipitación en México en el 2020 fue de 722.5 mm, lo que es 2.7 % menor al promedio anual del periodo base (1981-2010) y fue clasificado como el año número 21 más seco, de acuerdo con los registros desde 1941 (SMN, 2020).

En el 2020, la Ciudad de México experimentó su cuarto año más seco de acuerdo con los registros desde 1941. Los datos de las estaciones pluviales del SACMEX reportaron que los mayores acumulados se presentaron en las alcaldías de Cuajimalpa con 832 mm, M. Contreras, Tlalpan, A. Obregón con 800, 760 y 661 mm, respectivamente.

Los mínimos fueron en la alcaldía de Venustiano Carranza, con 344 mm de precipitación acumulada, seguida por Tláhuac con 352 mm, Gustavo A. Madero con 406 mm y Milpa Alta con 421 mm (**Figura 2.6**).

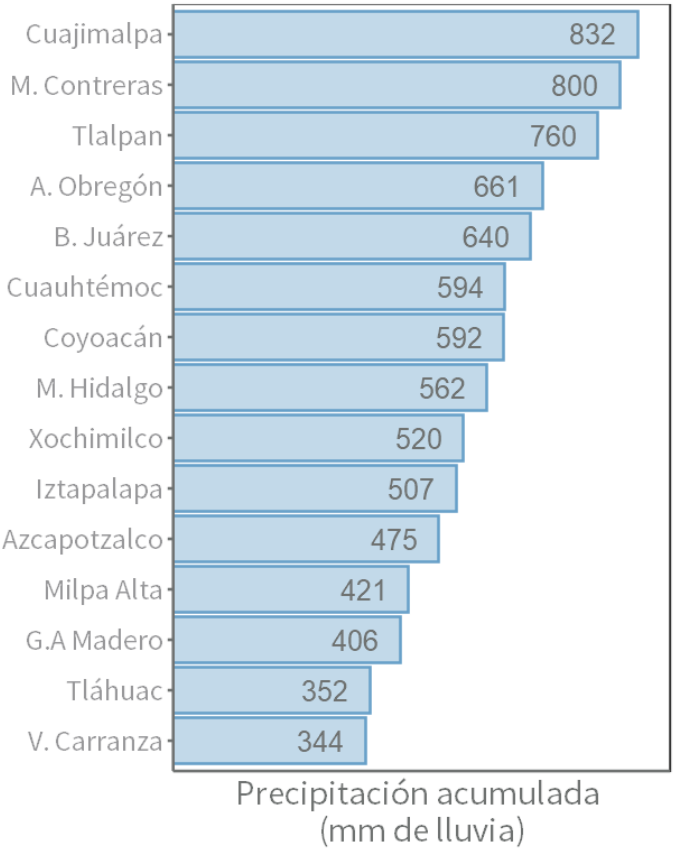


Figura 2.6. Precipitación acumulada por alcaldía de la Ciudad de México durante 2020 (SACMEX, 2021).

VIENTO

El viento es el movimiento del aire respecto a la superficie terrestre y es consecuencia de las variaciones de la presión atmosférica. El viento actúa como agente transportador del aire, vapor de agua, contaminantes y efectúa los intercambios de calor en la atmósfera (MeteoGalicia, 2020). El viento se usa para describir la dirección predominante desde la cual sopla el viento con una cierta velocidad, la cual se mide generalmente en millas por hora (mph) o metro por segundo (m/s) (NOAA, 2023).

En el 2020, de acuerdo con la REDMET, el promedio anual de la velocidad del viento fue de 2.2 m/s (**Figura 2.7a**), lo cual fue 0.1 m/s mayor al registrado en 2019. El máximo del promedio mensual fue en junio con 2.48 m/s, mientras que el mínimo fue en diciembre con 2.05 m/s (**Figura 2.7b**). En el perfil horario de la velocidad del viento (**Figura 2.7c**) se observó que los valores mínimos ocurrieron durante la madrugada y parte de la mañana, entre las 06:00 y 08:00 h; mientras que los máximos se registraron al final de la tarde entre las 17:00 y 19:00 h. En la **Figura 2.7d** se presenta el promedio anual de la velocidad de viento por estación; el valor mínimo se registró en Cuautitlán (CUT) e INN, ambas con 1.6 m/s y el máximo se presentó en Xalostoc (XAL) con 3.1 m/s; estas magnitudes fueron superiores a las reportadas en el 2019 por las mismas estaciones.

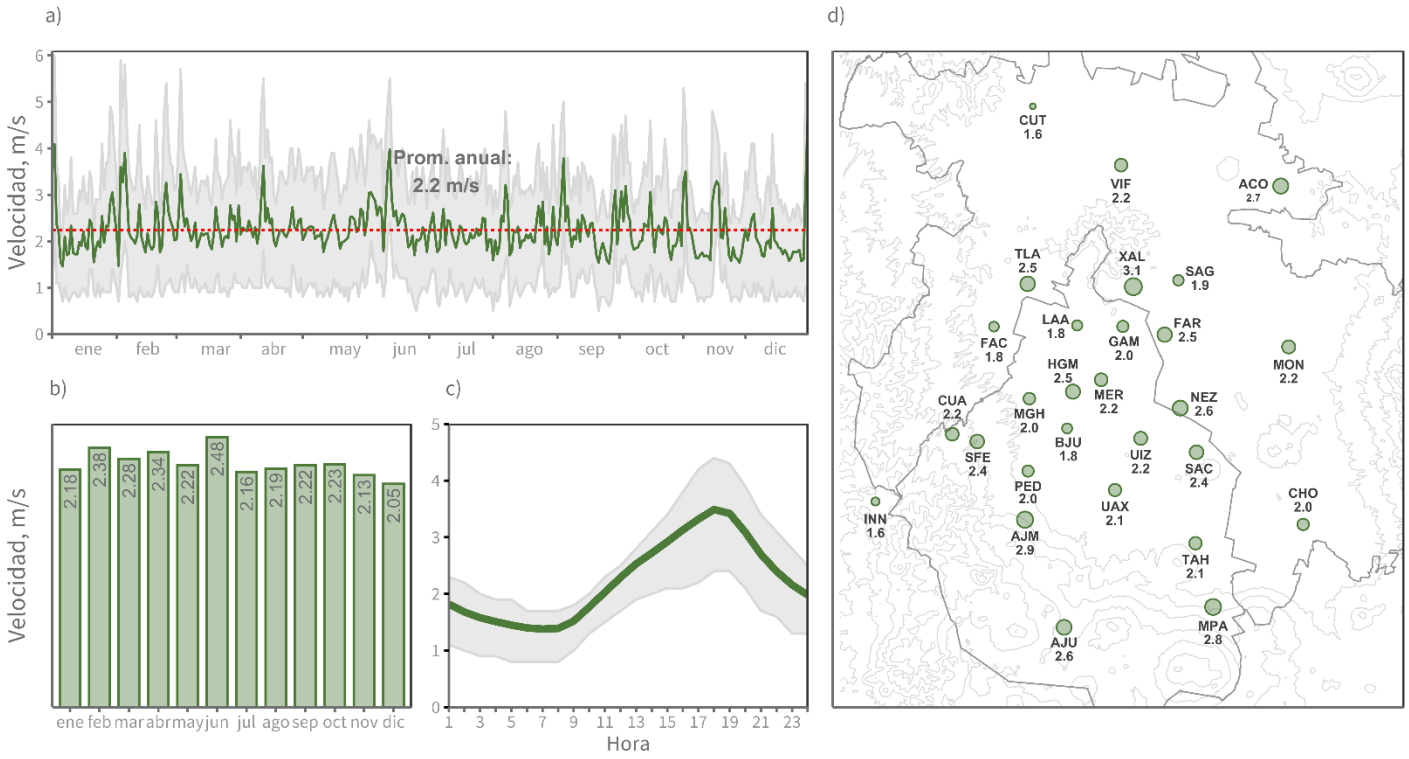


Figura 2.7. Comportamiento de la velocidad del viento en 2020: **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea verde continua), desviación estándar (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea verde es el promedio en cada hora y el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual de la velocidad de viento (m/s) por estación.

Un análisis de anomalías de la velocidad del viento (**Figura 2.8**) mostró que en 2020 los promedios mensuales fueron superiores a los que se han presentado con respecto al promedio 2000-2019; los meses con las anomalías positivas más altas fueron mayo y septiembre con 0.52 y 0.47 m/s, respectivamente. Las anomalías positivas durante todo el año, contribuyeron a un menor estancamiento de contaminantes; sin embargo, se presentaron condiciones de estabilidad que predominaron durante el año, así como anomalías positivas de temperatura y negativas de humedad relativa. Incluso con dichas condiciones adversas durante el año, solamente se registró un evento de contingencia por ozono.

La disminución en los episodios de alta concentración de ozono fue el resultado de las medidas para enfrentar la pandemia SARS-CoV-2 (COVID-19) que limitaron el transporte, los servicios y, en consecuencia, las emisiones de precursores de ozono.

En la **Figura 2.9** se presenta la dirección de viento a nivel de cuenca y se observa que en 2020 predominó un campo de viento con dirección de norte-noreste hacia el sur-suroeste; lo que es consistente con el patrón climático predominante de la ZMCM.

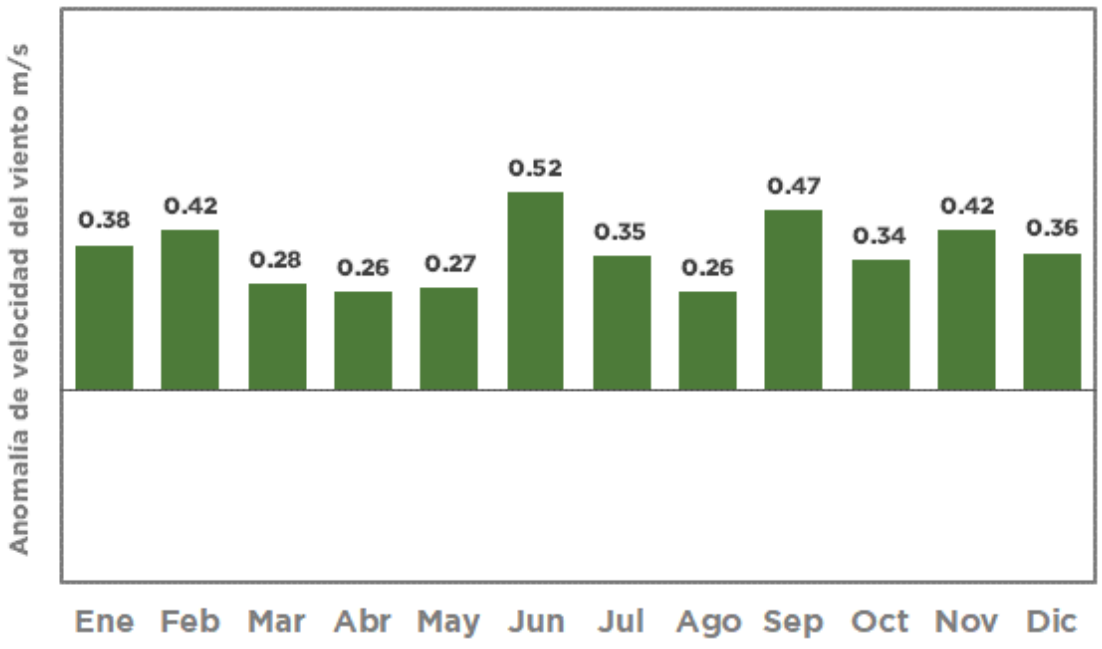


Figura 2.8. Anomalías mensuales de la velocidad del viento en la ZMCM durante 2020, calculada respecto al promedio de 2000-2019, se usaron las estaciones MER, PED, FAC y TLA, debido a la suficiencia de datos.

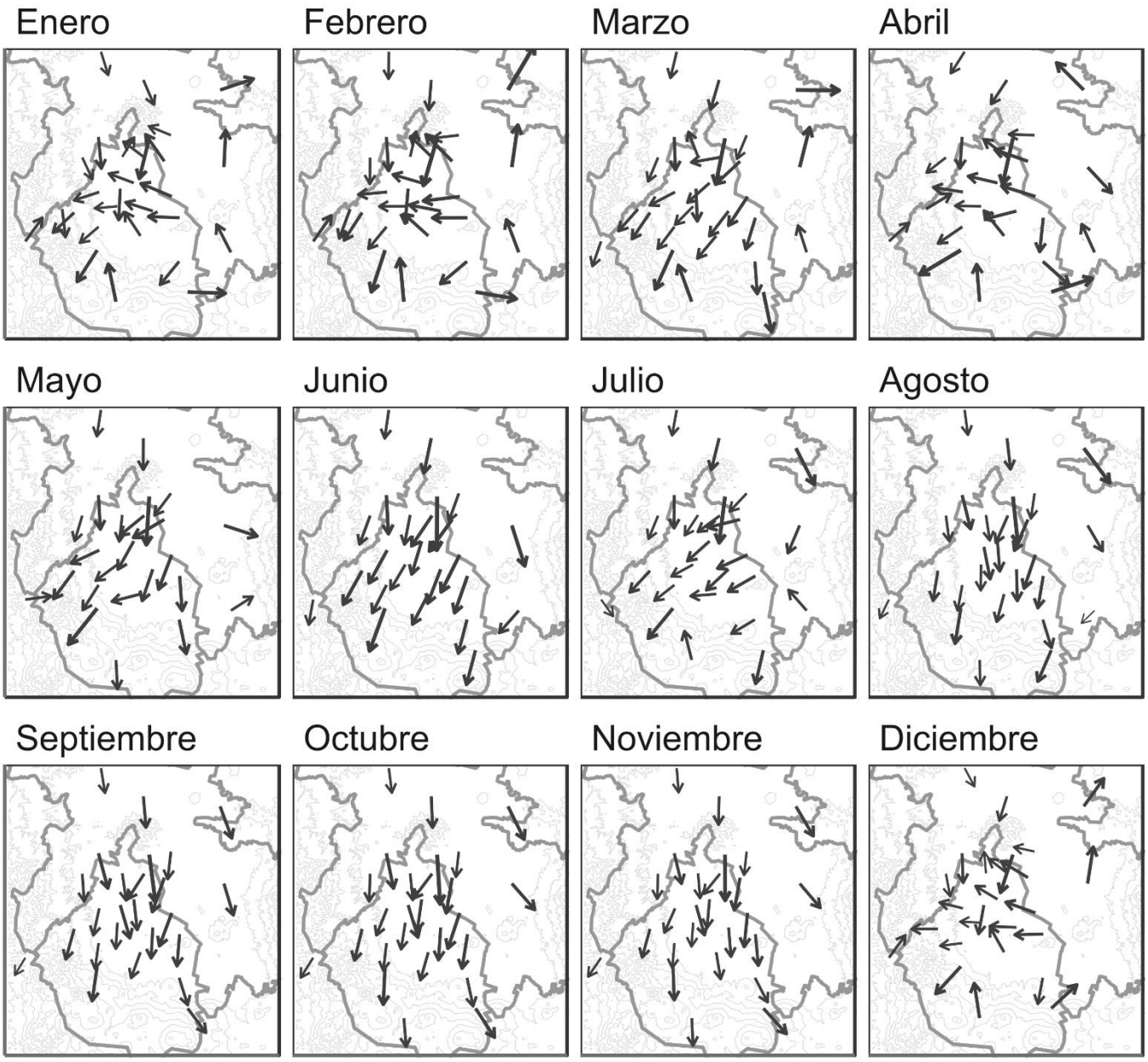


Figura 2.9. Campo de viento diurno en superficie. Las flechas de los vectores representan la dirección del viento predominante por mes entre las 08:00 y las 20:00 h; el tamaño del vector es proporcional a la intensidad del viento.

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce la masa de la atmósfera sobre la superficie terrestre un punto específico. Es proporcional a la densidad de la atmósfera, disminuye con la altitud y varía según la latitud. A una misma altitud, la presión está condicionada por cambios de temperatura y densidad de las masas de aire (Geoenciclopedia, 2022). La presión es un factor importante en la calidad del aire, ya que los sistemas de baja presión propician condiciones húmedas, lluvias y vientos, que pueden eliminar o dispersar contaminantes, mientras que los sistemas de alta presión, pueden ocasionar aire estancado y los contaminantes se concentran en un área (UCAR, 2023).

De acuerdo con los datos de la REDMET, el promedio anual de la presión atmosférica en 2020 fue de 585 mmHg (**Figura 2.10a**), el cual fue similar al de 2019.

En la **Figura 2.10b** se observa el comportamiento mensual en 2020, el mínimo se presentó en mayo con 584.6 mmHg, este valor se puede asociar al paso de frentes fríos cuando esta variable tiende a disminuir. El máximo mensual fue en noviembre con 586.0 mmHg. En el perfil horario de presión (**Figura 2.10c**) se observa que los máximos ocurren entre las 09:00 y las 10:00 h, mientras que los mínimos son de las 15:00 a las 17:00 h.

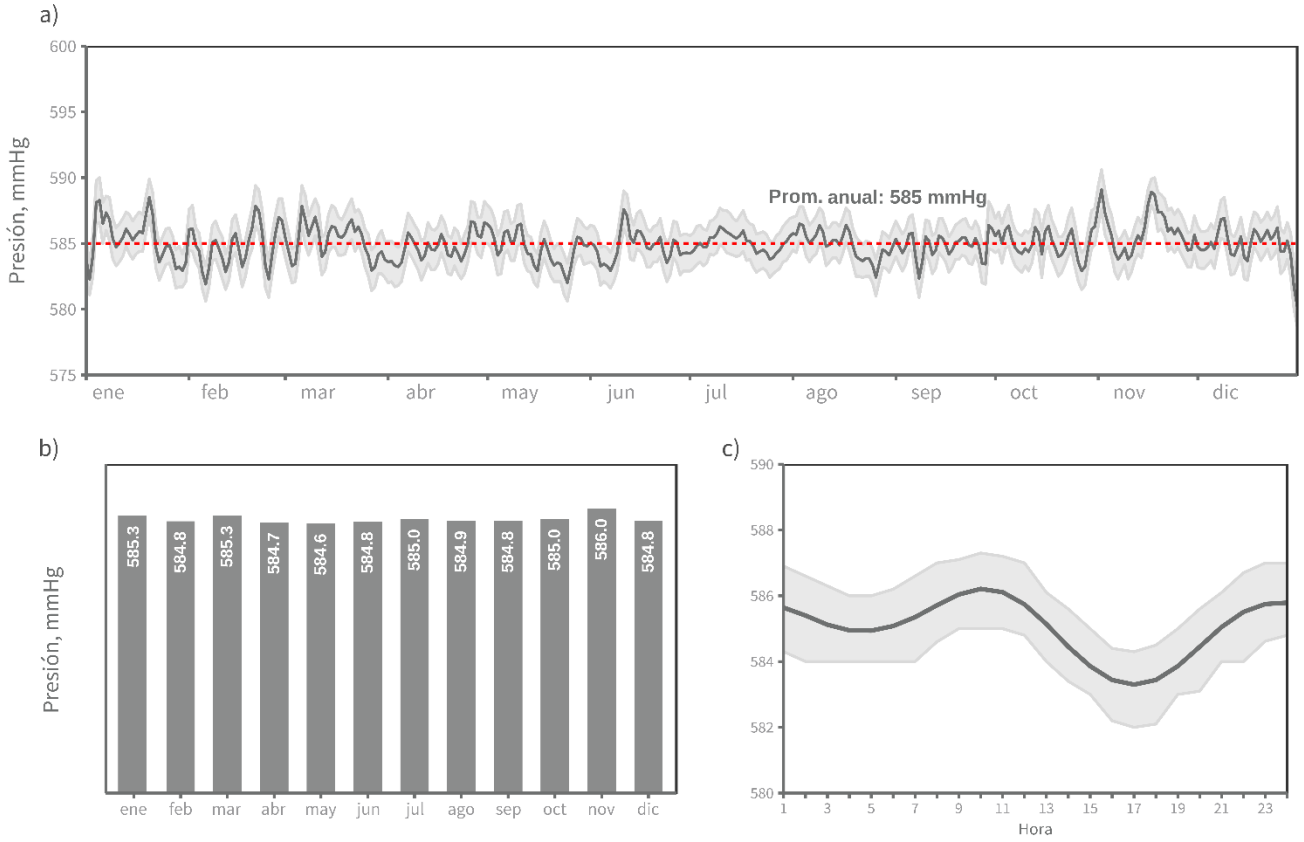


Figura 2.10. Comportamiento de la presión atmosférica en 2020. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gris continua), desviación estándar (sombreado gris) y el promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea gris es el promedio en cada hora y el sombreado gris es la desviación estándar.

Un análisis de las anomalías mensuales de la presión atmosférica (**Figura 2.11**) con respecto al promedio del período 2000-2019, mostró anomalías positivas durante 9 de los 12 meses del año y solamente en abril, julio y agosto fueron anomalías negativas. El descenso de las presiones está relacionado con el desplazamiento de zonas frontales y áreas de bajas presiones como vaguadas, influencia de ondas y ciclones tropicales. En abril hubo un aumento en la llegada de sistemas frontales al país, y fue el mes más activo desde 1981, con un total de 11 frentes, esto superó en 5 a la climatología (periodo base 1981-2010: 6 eventos en abril). Por el contrario, marzo y noviembre presentaron las anomalías positivas más altas, de 0.9 mmHg en ambos. Durante estos meses, los modelos de reanálisis mostraron persistencia de anomalías positivas de alto geopotencial en la tropósfera media, así como sistemas de alta presión en superficie, es por esto que durante noviembre se registró el único evento de contingencia ambiental por ozono durante el 2020.

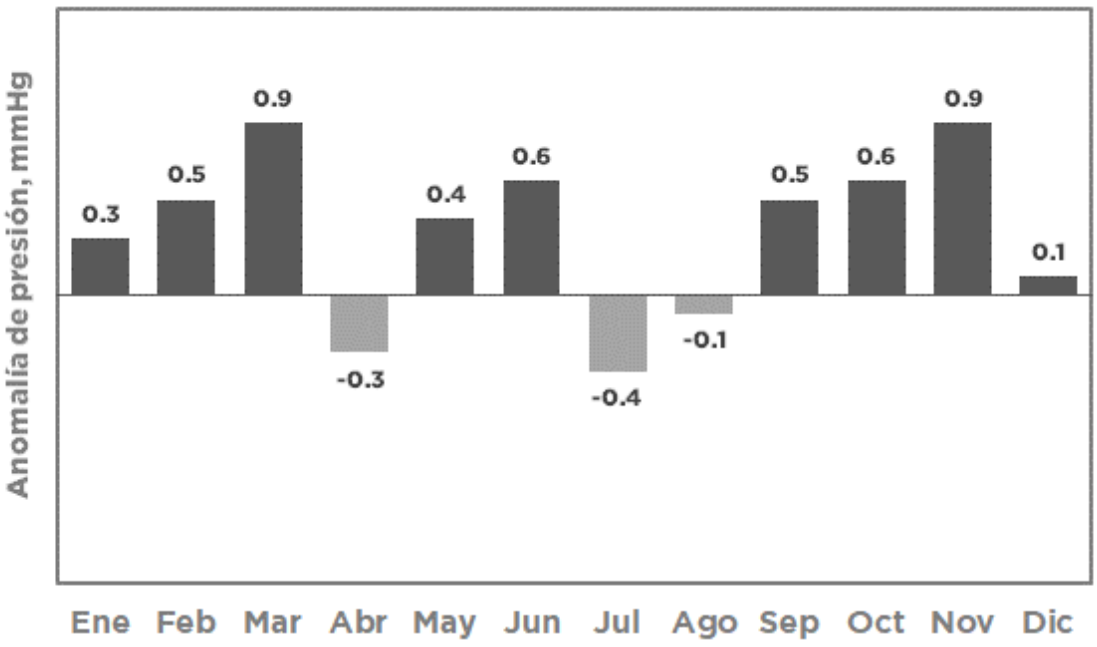


Figura 2.11. Anomalías mensuales de presión atmosférica durante 2020, calculada respecto al promedio de 2012-2019, se usaron las estaciones TLA y MER, debido a la suficiencia de datos.

RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA

La radiación UV se mide en unidades de irradiancia, que es la cantidad de energía incidente por unidad de tiempo y área, se expresa en Watts por metro cuadrado (W/m^2). La radiación UV es uno de los factores más relevantes en la formación de contaminantes como el ozono.

La CDMX recibe una cantidad importante de radiación UV debido a su latitud (19°40' N) y altitud (~2,240 msnm). En 2020, el promedio anual de la radiación UV-A y UV-B fue de 1.835 y 0.078 W/m^2, respectivamente (**Figura 2.12a**). Los niveles más altos ocurrieron de marzo a octubre y el máximo de UV-A se registró el 30 de agosto a las 13:00 h con 6.365 W/m^2, este mismo día y hora fue el máximo de UV-B con 0.387 W/m^2 .

Durante el año, la intensidad de la radiación varía con la declinación solar (**Figura 2.12b**) por lo que, los máximos se observan en el verano y los mínimos en el invierno. En la **Figura 2.12c** se presenta la variación de la radiación UV en el transcurso del día, se observa cómo su intensidad depende principalmente del ángulo de elevación del Sol, ya que la intensidad incrementa con el ascenso del Sol y es máxima cuando éste alcanza el punto más alto en el cielo, entre las 12:00 y 14:00 h. La intensidad de la radiación UV-B que incide en la ciudad es significativamente menor que la radiación UV-A; sin embargo, la UV-B es de mayor energía, en consecuencia, es más peligrosa y provoca un mayor daño en la salud humana, aún con valores bajos

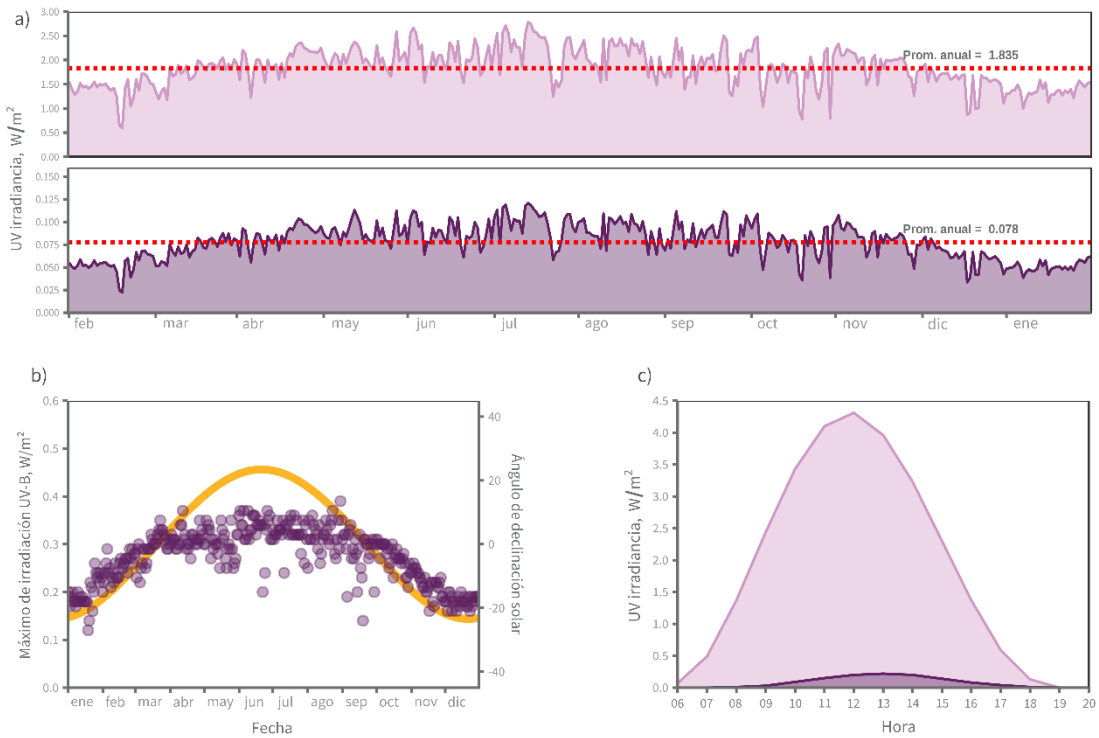


Figura 2.12. Comportamiento de la radiación UV-A y UV-B en 2020. **a)** Promedio diario de la irradiancia UV-A (superior) y UV-B (inferior) de 06:00 a 20:00 h. La línea punteada es el promedio anual. **b)** Comparación entre la intensidad máxima diaria de UV-B y el ángulo de declinación solar. **c)** Perfil diurno de UV-A (morado claro) y UV-B (morado oscuro).

ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR

El Índice de Radiación Solar (IUV) se calcula con la intensidad de la radiación UV-B que se reporta cada 10 minutos durante el día, esto con el objetivo de proporcionar información casi inmediata para los ciudadanos; sin embargo, para esta sección se calcularon y analizaron los promedios horarios.

El IUV en la ZMCM, utiliza la escala y colores recomendada por la OMS (de 1 a 11+), agregando el cero que es equivalente a la ausencia de radiación. El valor 11+ expresa un IUV de 11 o superior, es decir, si el índice alcanza un máximo equivalente a 15, se reportará como 11+ conforme a las recomendaciones de la OMS. La escala de este índice está agrupada en las siguientes categorías: **BAJA** (color verde) con IUV de 1 a 2; **MODERADA** (color amarillo) de 3 a 5; **ALTA** (color naranja) con valores de 6 a 7; **MUY ALTA** (color rojo) de 7 a 10 y **EXTREMADAMENTE ALTA** (color morado) con valores de 11 a 15. La última categoría, EXTREMADAMENTE ALTA, implica un riesgo considerable de daño en todos los fototipos de piel y en periodos cortos de exposición (menores a 15 min).

La intensidad de la radiación UV en la Ciudad de México normalmente presenta valores de IUV superiores a 7, lo cual incrementa el riesgo de daño en la piel sin protección en un tiempo de exposición menor a 30 minutos.

Entre marzo y octubre, se registran los máximos del índice y frecuentemente se supera el valor de 11 en periodos de una a tres horas continuas, mientras que los mínimos del IUV son desde mediados de noviembre a diciembre. El momento del día con los valores más altos del índice (IUV de 11+) y por lo tanto, mayor riesgo, es entre las 11:00 y 16:00 h.

En 2020, el IUV tuvo intensidad MODERADA en tres días: dos en enero y uno en septiembre; en categoría ALTA se registraron 39 días que ocurrieron durante enero, noviembre y diciembre; para la intensidad MUY ALTA se presentaron 100 días, la mayoría en la temporada seca-fría (noviembre a febrero) y algunos en la temporada de lluvias (junio a octubre); finalmente, en el IUV EXTREMADAMENTE ALTO se registraron 224 días, esto es un decremento del 3 % comparado con 2019. Los valores más altos del índice, IUV de 15, tuvieron un total de 8 días en el año, uno en abril, cinco en junio y dos en agosto (**Figura 2.13**).

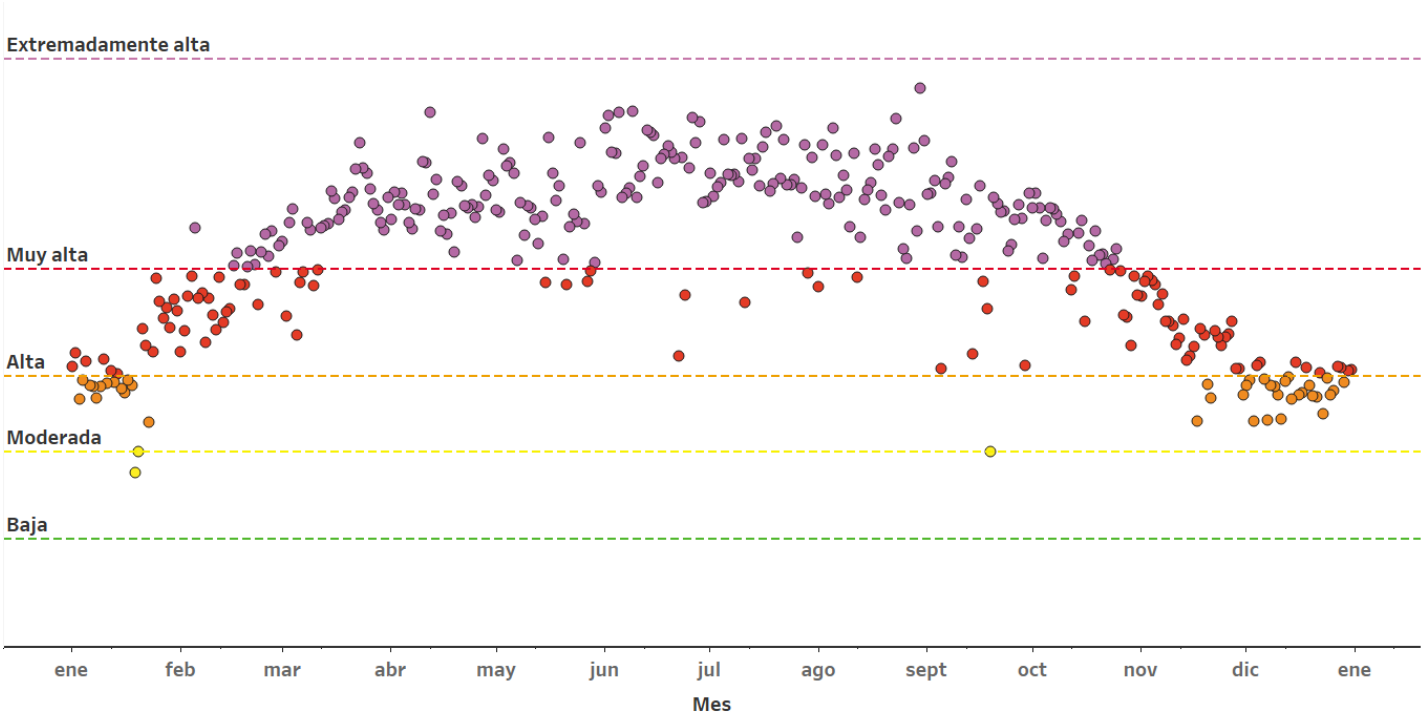


Figura 2.13. Comportamiento del máximo diario del IUV durante 2020.

INFORME ANUAL
2020

CAPÍTULO 3

CALIDAD DEL AIRE

El confinamiento ocasionado por la pandemia del coronavirus SARC-CoV2 (COVID-19), dio como resultado que los patrones de comportamiento de los contaminantes se modificaran, en algunas ciudades del mundo se reportó una mejora de la calidad del aire y ha sido documentado en numerosos artículos científicos (Krecl et al, 2020; Singh et al., 2020; Tobías et al, 2020; Grange et al, 2021; Shi et al, 2021, Slezakova et al., 2021; Sokhi et al., 2021; Vega, et al., 2021; Saha et al., 2022). El confinamiento fue una herramienta eficaz para detener la propagación del COVID-19 en todo el mundo, obligó a la población a quedarse en sus casas y solamente los servicios esenciales siguieron en operación. La restricción vehicular, el cierre de industrias, servicios, comercios y otras actividades que no se consideraban esenciales, resultaron en la reducción significativa de movilidad, fortalecimiento de la modalidad de trabajo remoto y con ello también la reducción de las emisiones antropogénicas de contaminantes primarios atmosféricos. Sin embargo, las emisiones naturales, las producidas en los hogares y la de servicios básicos siguieron contribuyendo a la contaminación en la ciudad.

El estudio de Sokhi et al. (2021) menciona que, durante el confinamiento a nivel global, la reducción de la concentración del dióxido de nitrógeno (NO_2) fue del 70 % y entre el 30 % al 40 % en la media de las $PM_{2.5}$, comparado con el mismo periodo[1] del 2015 a 2019.

Las $PM_{2.5}$ tienen un comportamiento complejo incluso dentro de la misma región, por ejemplo, en las ciudades de España se presentaron incrementos en las $PM_{2.5}$, que fueron ocasionados por el transporte del polvo desde África y/o la quema de biomasa. Algunas ciudades en China también registraron aumento en las $PM_{2.5}$ durante el confinamiento, en este caso se debían a la formación de partículas secundarias

Para el ozono (O_3), se encontraron cambios variables alrededor del mundo como: con ningún tipo de cambio, pequeños incrementos en Asia y Sudamérica. En el caso del dióxido de azufre (SO_2) hubo una reducción de la concentración del 25 al 60 % durante 2020 para todas las regiones, comparado con datos del 2015 al 2019. En el monóxido de carbono (CO), se observaron anomalías negativas en todas las regiones con disminuciones superiores al 40 % en Sudamérica. Algunos sitios fueron afectados por los incendios y esto atenuó el decremento ocasionado por las restricciones en movilidad.

El análisis de los oxidantes ($Ox = NO_2 + O_3$) muestra que las emisiones primarias de NO_2 en las zonas urbanas eran mayores que la producción de O_3, mientras que, en áreas alejadas de la urbanización y emisiones antropogénicas, el Ox era transportado, en su mayoría, por las contribuciones regionales y no por las concentraciones locales de NO_2 y O_3.

[1] El periodo es diferente para cada región, ya que cada país decreto el confinamiento de forma diferenciada, sin embargo, ese periodo se consideró para los años comparativos de 2015 a 2019

La meteorología, así como las contribuciones esporádicas (por ejemplo, el polvo, las emisiones domésticas, la quema de biomasa agrícola y uso de fertilizantes en los cultivos), tuvieron un papel fundamental en la calidad del aire dentro y alrededor de las ciudades durante el confinamiento y la reducción de emisiones cotidianas.

El comportamiento mostrado, sobre todo para los contaminantes secundarios requieren una mayor investigación con el fin de entender su proceso químico en la formación y su respuesta a los cambios de emisión en condiciones meteorológicas complejas, junto con el cambio climático, factores socioeconómicos y cómo puede afectar la calidad del aire en el futuro. Las implicaciones de las políticas regionales y globales son significativas, ya que durante la pandemia COVID-19 fue notable que los niveles de las $PM_{2.5}$ no cumplieron con el valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en muchas partes del mundo, a pesar de la reducción drástica en la movilidad y actividades de producción. En consecuencia, se requiere examinar los acuerdos y la regulación de la calidad del aire (por ejemplo, el Protocolo de Gotemburgo) con objetivos más ambiciosos que sean específicos para las diferentes regiones del mundo (Sokhi et al, 2021) y considerar el transporte de contaminantes regional.

En este capítulo se analizó la calidad del aire registrada en el año 2020 y en algunos de los contaminantes se observaron los efectos positivos del confinamiento, especialmente durante los meses con la mayor reducción de las emisiones causadas por las restricciones de movilidad en la ZMCM.

Es importante mencionar que de los 34 sitios que conforman la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), en este año solamente 22 tuvieron suficiencia anual de datos, esto debido a que algunas estaciones de monitoreo se ubican en instituciones de salud, las cuales fueron adaptados para atender la emergencia sanitaria de COVID-19, así como centros escolares, en los cuales no se permitió el acceso al sitio, por lo que fueron excluidas de algunos análisis (Ajusco Medio (AJM), Cuajimalpa (CUA), Hospital General de México (HGM), Iztacalco (IZT), Gustavo a Madero (GAM), Xalostoc (XAL)donde se requiere la suficiencia anual de información. Para fines comparativos con otros años, este análisis se realizó considerando las mismas estaciones con suficiencia en 2020 y en el resto de los años.

En la **Tabla 3.1** se presenta el porcentaje de suficiencia para cada contaminante por estación, con el sombreado azul se señala las que presentan mediciones con al menos el 75% de datos.

Tabla 3.1. Estaciones de monitoreo y la suficiencia de datos (%) por contaminante, para este análisis solamente se utilizaron los sitios que tienen más del 75 %.

CLAVE	ESTACIÓN	CO	NO, NOx	NO_2,	O_3	SO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PMco
ACO	Acolman	0	0	0	0	0	43	-	-
AJM	Ajusco Medio	51	47	47	28	51	0	0	0
AJU	Ajusco	-	-	-	53	-	-	46	-
ATI	Atizapán	88	91	91	93	93	92	-	-
BJU	Benito Juárez	94	-	96	93	95	88	88	88
CAM	Camarones	96	96	96	95	96	75	75	75
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera	71	92	92	95	96	-	86	-
CHO	Chalco	0	0	0	0	0	0	-	-
CUA	Cuajimalpa	50	50	50	50	49	41	-	-
CUT	Cuautitlán	-	86	86	82	85	84	-	-
FAC	FES-Acatlán	96	95	95	95	96	84	-	-
FAR	FES-Aragón	92	-	96	93	95	-	96	-
GAM	Gustavo A. Madero	-	-	81	81	-	54	54	54
HGM	Hospital General de México	56	55	55	56	50	0	0	0
INN	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares	95	-	-	95	95	94	94	94
IZT	Iztacalco	56	57	57	57	57	59	-	-
LLA	Los Laureles	64	27	27	63	61	-	-	-
LPR	La Presa	59	-	-	60	54	-	-	-
MER	Merced	91	90	90	94	94	78	78	78
MGH	Miguel Hidalgo	87	82	82	88	87	0	0	0
MON	Montecillo	68	80	80	79	79	-	31	-
MPA	Milpa Alta	60	-	64	63	64	0	0	0
NEZ	Nezahualcóyotl	91	95	95	95	93	-	75	-
PED	Pedregal	91	95	95	95	94	92	92	92
SAC	Santiago Acahualtepec	80	92	92	91	63	-	87	-
SAG	San Agustín	86	87	87	87	49	82	82	82
SFE	Santa Fe	84	94	94	90	89	96	96	96
TAH	Tláhuac	94	94	94	95	94	47	-	-
TLA	Tlalnepantla	92	92	92	95	93	77	77	77
TLI	Tultitlán	21	21	21	21	21	0	-	-
UAX	UAM-Xochimilco	94	90	90	96	84	-	95	-
UIZ	UAM-Iztapalapa	95	95	95	94	95	88	88	88
VIF	Villa de las Flores	94	94	94	92	92	86	-	-
XAL	Xalostoc	0	0	0	0	0	0	0	0

El guion (-) indica que ese contaminante no se mide en la estación; el cero (0) representa que no hubo medición ese año

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El dióxido de azufre (SO_2) se compone de un átomo de azufre y dos átomos de oxígeno, pertenece al grupo de compuestos químicos llamados óxidos de azufre (SOx) que están constituidos por azufre y oxígeno. El SO_2 a temperatura ambiente se encuentra en fase gaseosa, tiene una densidad mayor a la del aire y se percibe con un olor acre e irritante, no es un gas inflamable o explosivo y tiene mucha estabilidad. Es un compuesto precursor de la lluvia ácida ya que es soluble en agua y se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4). Durante su proceso de oxidación en la atmósfera, este gas forma sulfatos (SO_4), los cuales contribuyen en el material particulado PM_{10}. En presencia de humedad el SO_2 produce ácidos en forma de aerosoles y se genera una parte importante del material particulado secundario o fino ($PM_{2.5}$).

Las fuentes de emisión del SO_2 pueden ser de origen natural como los volcanes; sin embargo, las principales fuentes de emisión son antropogénicas como es la combustión de productos petrolíferos, refinerías, quema de carbón en centrales eléctricas y la industria de extracción de metales.

El SO_2 se utiliza en la fabricación del papel como agente blanqueador, en la industria alimenticia se usa como aditivo (conocido como **E220**) debido a sus características conservantes y antibacterianas, se utiliza en vinos (como sulfitos), cervezas, jugos, caramelos, yemas de huevo, entre otros productos. Los efectos de su consumo en dosis bajas provocan irritación en el tubo digestivo e inactiva la Vitamina B, mientras que, en grandes dosis, puede provocar dolores de cabeza, náuseas, vómitos, alergia, irritación de los bronquios y asma (Instituto para la Salud Geo Ambiental, 2022; EPA Victoria-Australia 2023; U.S. EPA, 2023). El SO_2 en el aire ambiente tiene diversos efectos en la salud de la población y están descritos en el **Capítulo 1** de este informe.

El SO_2 es un contaminante que contribuye a la lluvia o deposición ácida, lo que conlleva a posibles cambios en la calidad del suelo y el agua. El daño de la deposición ácida puede ser significativo, ya que incluye efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, ríos y lagos, así como el daño a los bosques, cultivos y varios tipos de vegetación. En numerosas regiones del mundo, la deposición de sustancias acidificantes aún excede las cargas críticas de los ecosistemas[2]. Además, la lluvia ácida también puede dañar edificios y monumentos culturales (Torres, 2022).

[2]**Carga crítica.** Se define la carga crítica de acidez de un ecosistema como "nivel máximo de compuestos acidificantes aportados, que no causan cambios químicos que perjudiquen a largo plazo la estructura y funcionamiento del mismo"

El promedio anual de la concentración de SO_2 calculado para todas las estaciones de monitoreo con suficiencia de datos en 2020 (**Tabla 3.1**) fue de 3.2 ppb, este valor fue igual al del 2019 (considerando las mismas estaciones). En los sitios ubicados dentro de la Ciudad de México el promedio fue de 3.1 ppb, mientras que en los municipios conurbados del Estado de México fue de 3.3 ppb. Los promedios más altos de concentración se registraron en las estaciones del norte de la zona metropolitana (**Figura 3.1a**), lo cual se ha relacionado con el transporte regional desde el corredor industrial Tula-Tepeji, ubicado a 60 km al noreste de la Ciudad de México (de Foy et al., 2009; Rivera et al., 2009).

A nivel estación, el promedio anual más alto fue en el sitio Tlalnepantla (TLA), en el Estado de México, con una concentración anual de 6.4 ppb, seguida de Villa de las Flores (VIF) con 5.3 ppb y Cuautitlán (CUT) con 4.5 ppb. Por otro lado, las estaciones de la periferia registraron los valores anuales mínimos como Tláhuac (TAH), Montecillo (MON) e Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 1.7, 1.5 y 1.1 ppb respectivamente (**Figura 3.1b**). El máximo anual para el promedio de 24 horas fue de 37 ppb, registrado el 2 y 14 de febrero en la estación VIF, en Coacalco, Estado de México. Mientras que el promedio horario máximo del año fue 170 ppb, registrado el 6 de enero en la misma estación.

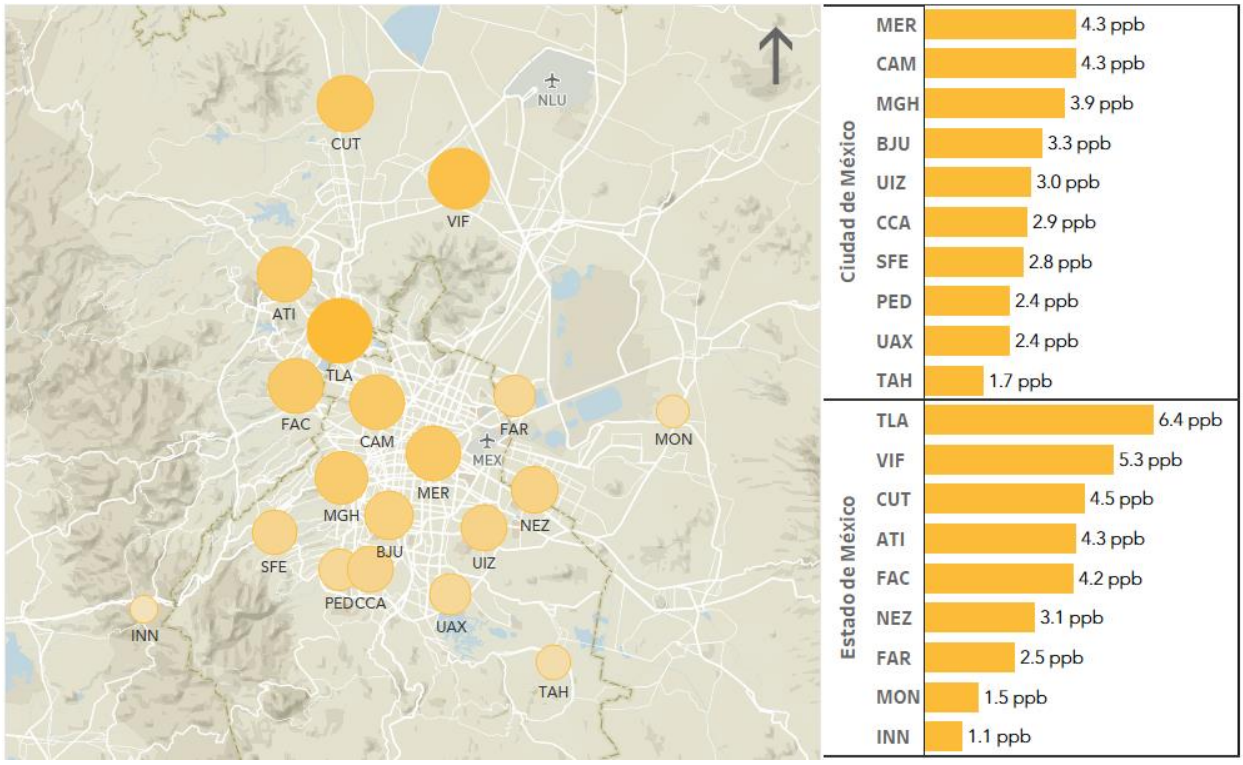


Figura 3.1. Promedio anual de SO_2 por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad.

En la serie de tiempo para el promedio de 24 horas y concentraciones horarias (**Figura 3.2a**) se observa que los máximos horarios altos (> 100 ppb) tienen una mayor intensidad y frecuencia en los meses de enero, febrero, marzo, junio, octubre, noviembre y diciembre. Estos incrementos se presentaron principalmente en las estaciones de monitoreo ubicadas al norte de la zona metropolitana.

En 2020, el máximo del promedio mensual se registró en octubre y febrero con 5.0 ppb, seguido de enero con 4.9 ppb, esto difiere con los años anteriores, en los que el máximo mensual se observó en diciembre. A mediados de junio del 2020, se registraron valores horarios más altos de lo normal en casi todas las estaciones, en algunas se superó los 100 ppb y el máximo horario fue en TLA con 139 ppb, esto provocó que el promedio mensual de junio aumentara, incluso en la estación INN, en la que junio y octubre registraron sus promedios mensuales más altos con 1.49 ppb (**Figura 3.2b**).

En el análisis del comportamiento por día de la semana (**Figura 3.2c**), el promedio máximo fue 3.5 ppb y se registró el lunes, miércoles y jueves, este comportamiento cambió en comparación con 2019, ya que el año pasado los días con los máximos fueron miércoles (3.5 ppb), sábado (3.5 ppb) y domingo (3.6 ppb). En los informes anteriores se ha mencionado que el SO_2 no tiene un patrón definido por día de la semana y esto se ha observado desde 2010 a 2020, ya que todos los años presenta diferentes patrones y está asociado a que las fuentes principales de emisión de SO_2 no son los vehículos.

El perfil horario del SO_2 en 2020(**Figura 3.2d**), tuvo un comportamiento variable entre estaciones y de manera general, presentó un perfil unimodal con máximos alrededor de las 10:00 h, en la mayoría de las estaciones se observó un incremento entre las 08:00 hasta las 10:00 h y decrece a partir de las 11:00 h. En 2020, los sitios ubicados al norte de la zona metropolitana presentaron valores altos durante la noche, con incrementos desde las 21:00 hasta las 05:00 h, esto se observó cuando la dirección del viento dominante proviene del noroeste y es más notable durante los meses fríos cuando la capa de mezcla disminuye en la noche y madrugada. En las estaciones que se ubican próximas a vialidades con tránsito de vehículos a diésel, como es el caso de la estación MER, el perfil horario es diferente y se relaciona con emisiones locales. El sitio INN tiene un comportamiento horario completamente diferente al resto de las estaciones, ya que presenta el incremento a las 09:00 h y se mantiene prácticamente constante con un máximo a las 16:00 h y decrece alrededor de las 23:00 h, este comportamiento se relaciona con el transporte del contaminante desde el noroeste. El patrón fue determinado por el Sistema de Pronóstico de la CDXM (AQFS-CDMX), en algunas ocasiones muestra como la emisión proveniente de la zona de Tula llega hasta el sur de la ZMCM.

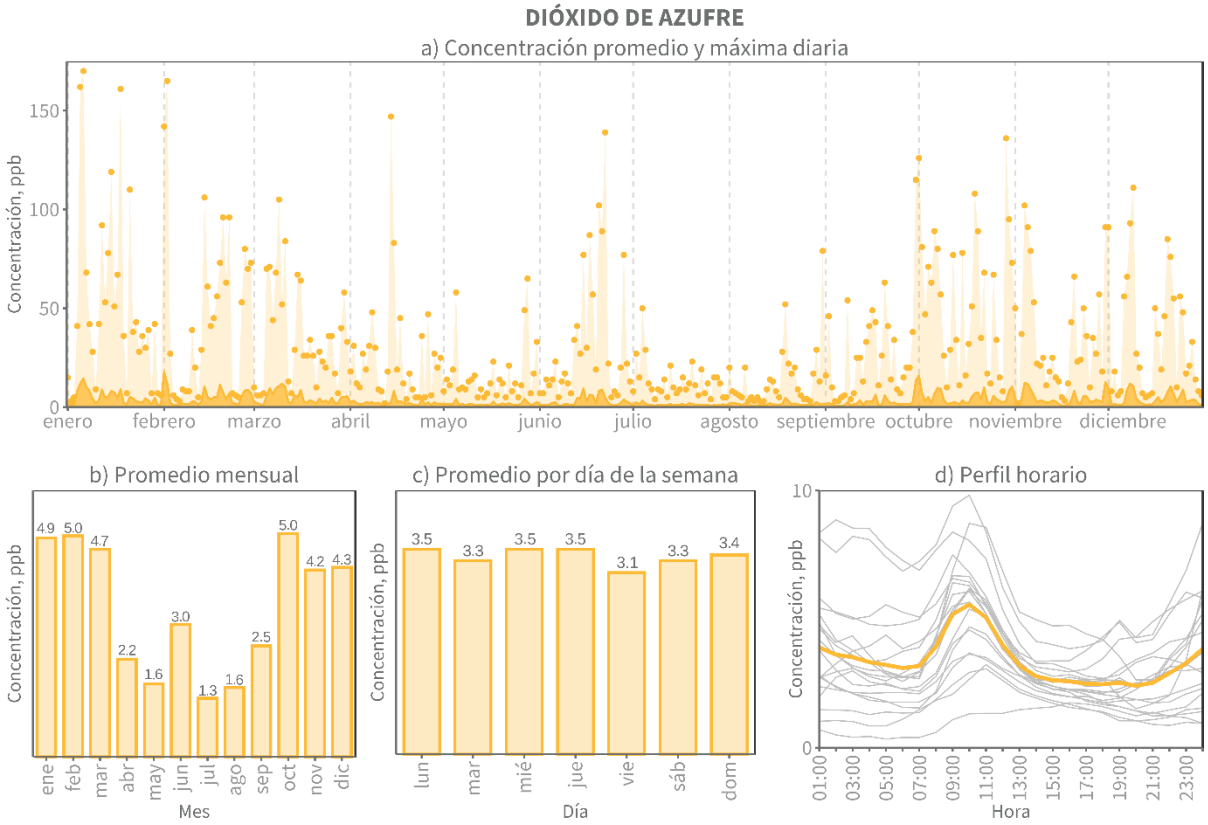
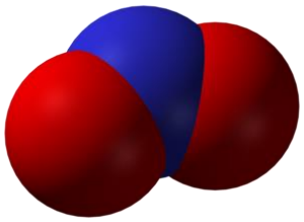


Figura 3.2. Distribución temporal del SO_2 en 2020. **a)** El promedio diario es el área en amarillo oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea amarilla representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOx)



Cuando el oxígeno y el nitrógeno se combinan, forman compuestos químicos gaseosos llamados óxidos de nitrógeno (NOx). En la atmósfera, generalmente podemos encontrar los óxidos de nitrógeno en tres compuestos distintos: óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2).

El **dióxido de nitrógeno** (NO_2) es un gas fuertemente tóxico de color pardo rojizo. Este óxido de nitrógeno es el de mayor importancia los tres debido a sus efectos sobre la salud humana, también es precursor de la lluvia ácida, cuando entra en contacto con agua, se forma ácido nítrico (HNO_3). El **óxido nítrico** (NO) es un gas tóxico e incoloro que reacciona con el ozono para formar NO_2 y participa activamente en las reacciones atmosféricas causando el "smog". El **óxido nitroso** (N_2O) es un gas incoloro, no inflamable ni tóxico y es el óxido de nitrógeno más abundante en la atmósfera baja, es un gas de efecto invernadero, tiene un papel fundamental en el ciclo de nitrógeno y es precursor de otros óxidos de nitrógeno causantes de nieblas de contaminación fotoquímica.

Es importante mencionar que, de los tres compuestos, sólo el NO y el NO_2 se consideran contaminantes y son formados en los procesos de combustión, así como de la oxidación del nitrógeno atmosférico.

Existen fuentes que emiten NO y NO_2 directamente a la atmósfera, estos son **primarios** y con el tiempo el NO se oxida y genera NO_2 **secundario y favorece la** que la relación NO/NO_2 sea más alta cerca de las fuentes de emisión en comparación con las zonas alejadas de la urbanización. En las ciudades, el tránsito vehicular generalmente aporta más del 75 % del NO_2 en el aire, mientras que otras fuentes de emisión son las centrales eléctricas, industrias, fuentes comerciales y domésticas. En la industria, los NOx son usados en la producción de lacas, tinturas, combustibles para cohetes, en la nitrificación de compuestos químicos orgánicos, elaboración de explosivos, como conservante de carne, en la producción de ácido nítrico para crear abonos, colorantes, fabricación del ácido sulfúrico, grabado de metales y medicamentos. Además, diversas investigaciones de finales del siglo XX descubrieron efectos benéficos del uso de nitratos orgánicos en el tratamiento de ataques de angina, dolores de pecho o arteriosclerosis (U.S. EPA, 2023; Eroski Consumer, 2023; Gobierno de Canarias, 2023).

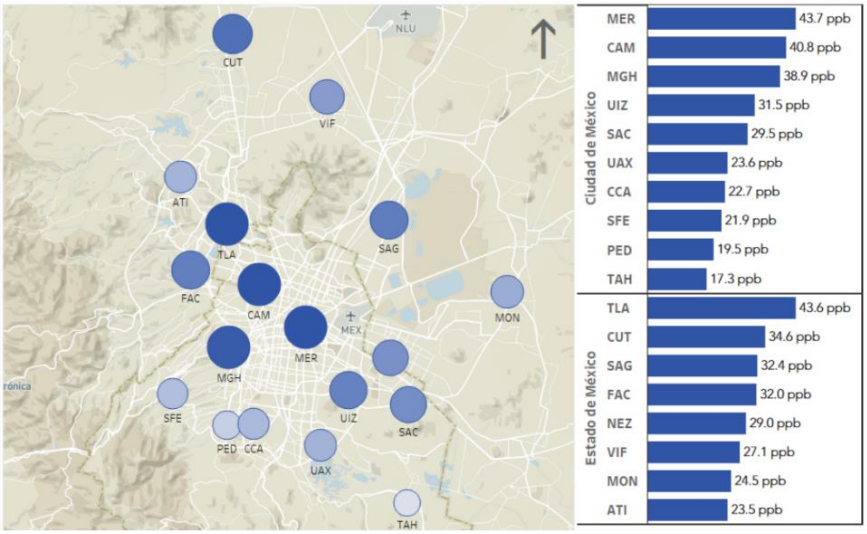
Los NOx en el aire contribuyen de manera importante en el desarrollo de fenómenos como la "acidificación del medio" y el "smog fotoquímico". Los óxidos de nitrógeno junto con los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en presencia de la luz solar y forman **oxidantes fotoquímicos**. El oxidante fotoquímico más importante, por su abundancia y toxicidad, es el ozono troposférico (O_3), que junto con los Peroxiacetilnitratos (PAN), es uno de los principales causantes del "smog fotoquímico".

Durante 2020, los promedios anuales de NOx, NO_2 y NO para todas las estaciones con suficiencia de datos (**Tabla 3.1**) fueron 30, 19 y 10 ppb, respectivamente. Esto fue menor que en 2019, que registraron 36 ppb para NOx, 22 ppb en NO_2 y 13 ppb para NO. Para los sitios dentro de la Ciudad de México, los promedios anuales fueron de 29 ppb (NOx), 20 ppb (NO_2) y 9 ppb (NO), mientras que, en el Estado de México, los promedios fueron 31, 19 y 12 ppb para NOx, NO_2 y NO, respectivamente.

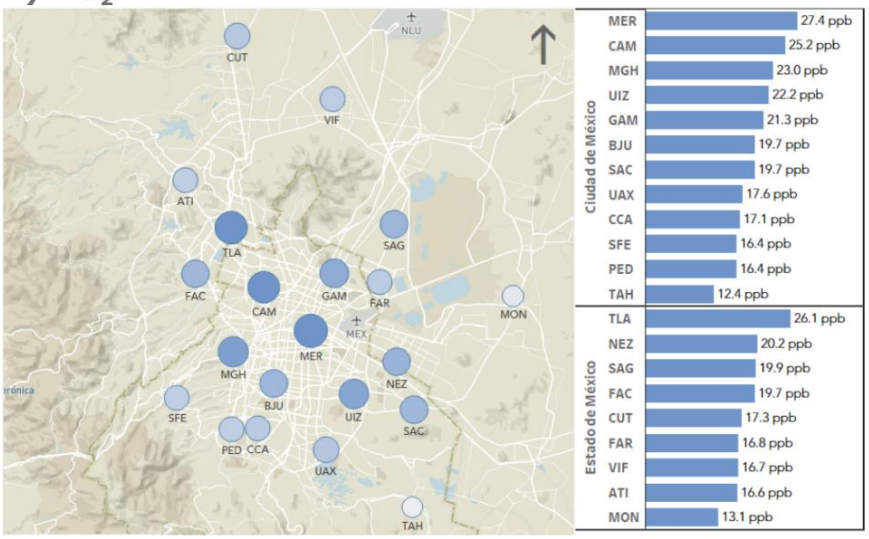
Las fuentes principales de estos contaminantes son los motores de combustión interna, por lo que las estaciones ubicadas cerca de vialidades con mayor tránsito vehicular son las que registraron concentraciones más altas de NOx (TLA, CAM, MER, MGH, FAC y CUT). En estos sitios se pudo observar claramente el efecto que tuvo la restricción de actividades durante abril y mayo, con una reducción del 32 % en el promedio de las seis estaciones cercanas a vialidades y la mayor reducción se registró en FAC con 41 %, mientras que CUT tuvo el mínimo con 19 %, ambas localizadas en el Estado de México. En el análisis del porcentaje de reducción entre 2019 y 2020 para los meses abril a mayo, se observó que Pedregal (PED) registró la máxima disminución en los tres óxidos con el 45 % en NOx, 75 % para NO y el NO_2 con 39 %, debido a que el sitio está ubicado en una zona residencial y tuvo una importante reducción en la circulación vehicular, por otro lado, CUT presentó el menor porcentaje de reducción con 19% para NOx, 26% en el NO y NO_2 con 15 %, debido a que este sitio está cerca de la carretera a Querétaro, que es un acceso importante a la ZMVM para el transporte de mercancía y carga, por lo tanto, la concentración de los óxidos de nitrógeno no disminuyó en la misma proporción que en las zonas residenciales.

La distribución espacial se presenta en la **Figura 3.3** y se observó que los valores más altos fueron en las estaciones de la región urbana con mayor tránsito vehicular como: MER, TLA, CAM, MGH y CUT. Mientras que los mínimos se registraron en las estaciones de la periferia. Los sitios MER y TLA presentaron los máximos de NOx con 44 ppb y también en NO_2 con 27.4 y 26.1 ppb, respectivamente. Para el NO, las concentraciones más altas fueron en TLA (17.5 ppb), CUT (17.3 ppb) y MER (16.3 ppb). La estación TAH presentó los mínimos para NOx con 17.3 ppb y para NO_2 fue 12.4 ppb y en el caso del NO, el mínimo fue en PED con 3.4 ppb, seguida de TAH con 4.9 ppb.

a) NOx



b) NO_2



c) NO

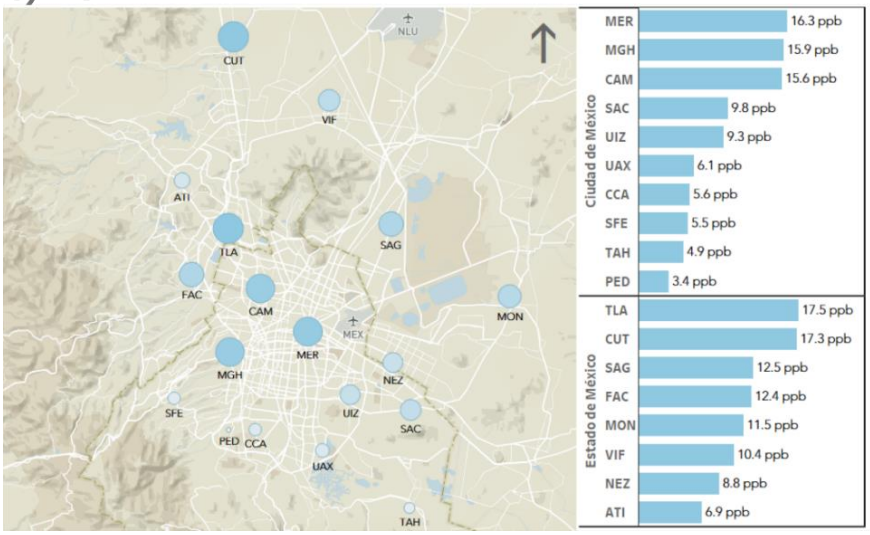


Figura 3.3. Promedio anual por sitio de monitoreo para: **a)** NOx, **b)** NO_2 y **c)** NO. En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad.

Las series de tiempo (**Figuras 3.4a, 3.5a** y **3.6a**), muestran el patrón estacional de los tres óxidos (NOx, NO_2 y NO) con los valores más altos en los meses fríos y con poca humedad (noviembre a febrero). Normalmente, en un año sin restricciones de actividades, los mínimos son en época de lluvia (junio a octubre); sin embargo, durante 2020 los valores más bajos se presentaron de abril a septiembre, y a partir de octubre, los promedios mensuales de 2020 son similares a los años pasados. Esto debido a la reducción de actividades durante la pandemia. En los promedios mensuales también se observó el efecto del confinamiento (**Figuras 3.4b, 3.5b** y **3.6b**), con promedios mínimos en abril de 22.4 ppb para NOx; 16.3 ppb en NO_2 y 5.9 ppb para NO, en comparación con el año 2019 la reducción fue del 33 %, 28 % y 42 %, respectivamente.

En el comportamiento por día de la semana (**Figuras 3.4c, 3.5c** y **3.6c**), las concentraciones más altas se presentaron en los días laborables (lunes a viernes) con un decremento en fines de semana, este patrón es más notorio en los sitios de monitoreo cercanos a vialidades. En 2020, la concentración más alta se registró en martes, mientras que los domingos tuvieron el mínimo. En años anteriores, los viernes registraban un ligero incremento debido a mayor tránsito vehicular; sin embargo, en este año cambio su comportamiento.

En el perfil horario, los patrones del NO y NOx tienen influencia de las emisiones y meteorología, su comportamiento horario tiene diferencias en los meses fríos, cuando la altura de la capa de mezcla es menor, en consecuencia, la concentración del pico durante la mañana es mayor que en los meses calientes y de lluvias. El perfil del NO_2 es más plano debido a que tiene una formación secundaria a partir del NO. Generalmente, el NO_2 tiene un máximo durante la mañana en la hora de mayor tránsito vehicular (08:00 h); sin embargo, en 2020 durante mayo y junio, el máximo se registró una hora antes (07:00 h) y a partir de las 19:00 h, nuevamente se observó un incremento gradual hasta las 24:00 h. En el comportamiento normal del NO_2, se presenta un aumento en la concentración, después del máximo de NO, aproximadamente a las 10:00 h, y se prolonga hasta las primeras horas de la tarde, posteriormente se presentaba un incremento durante la noche, debido a la reducción de la mezcla atmosférica por baja velocidad del viento y menor altura de la capa de mezcla, este comportamiento cambió debido a la pandemia, ya que en abril, mayo y junio no se presentó este segundo pico como en años pasados. En 2020, la concentración en todo el perfil horario fue menor comparado con 2019, NO registró un pico de 47 ppb mientras que 2019 fue 58 ppb; para NO_2 fue de 27 ppb y su pico en 2019 fue 30 ppb (**Figura 3.4d, 3.5d** y **3.6d**).

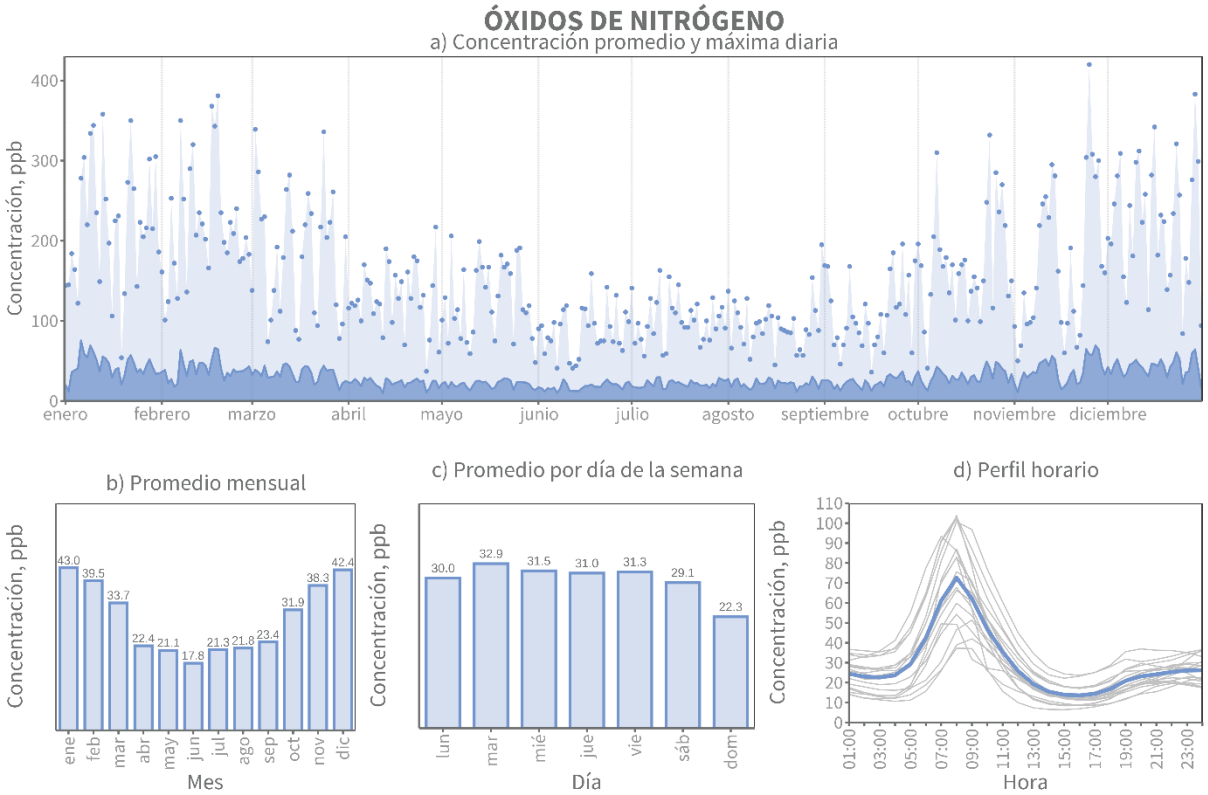


Figura 3.4. Distribución temporal del NOx en 2020. **a)** El promedio diario es el área en azul oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea azul oscura representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

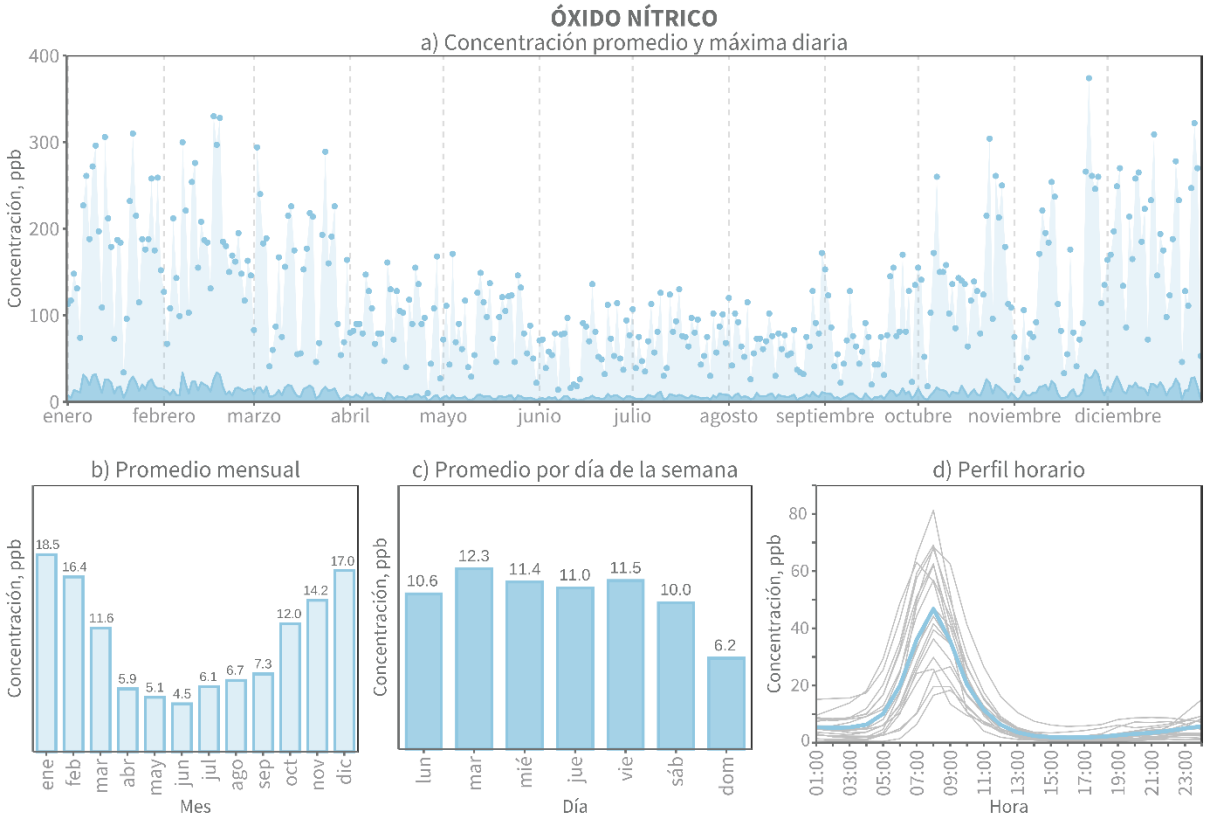


Figura 3.6. Distribución temporal del NO en 2020. **a)** El promedio diario es el área en azul más oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea azul representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

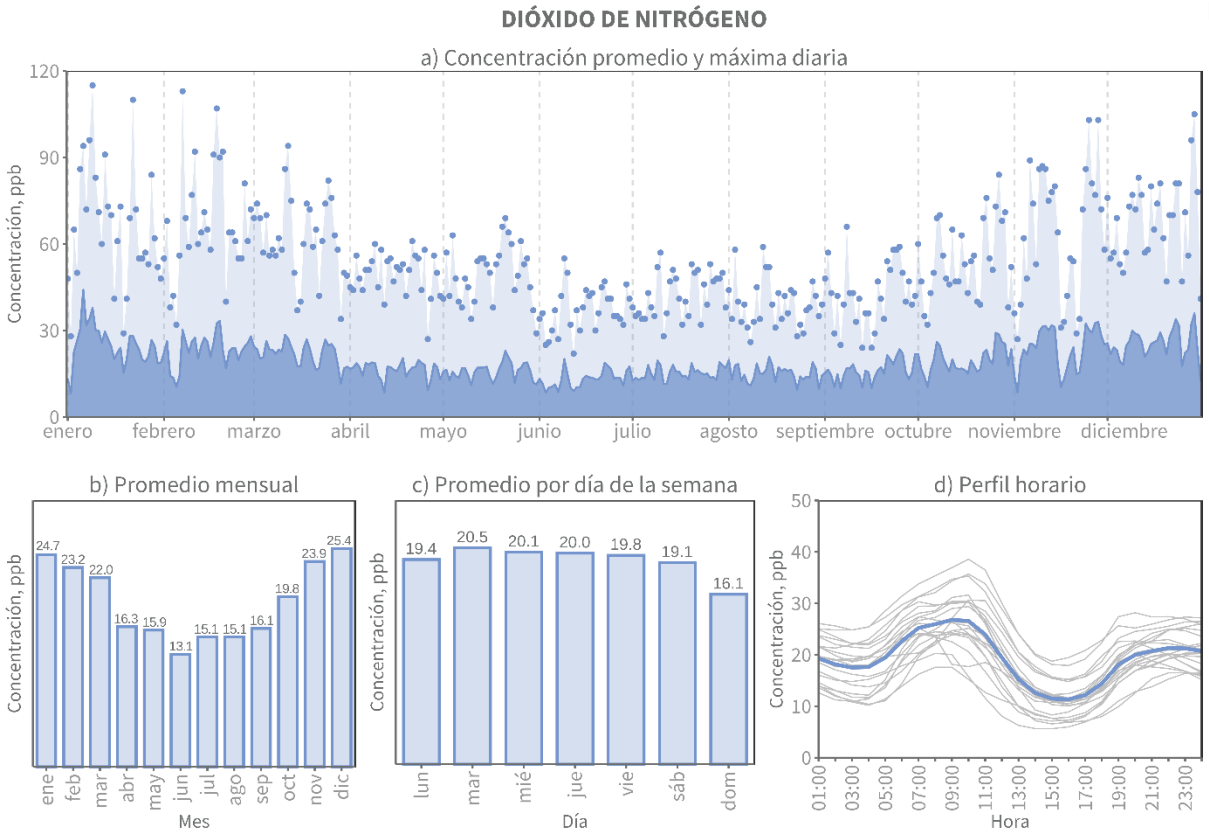
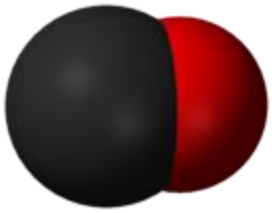


Figura 3.5. Distribución temporal del NO_2 en 2020. **a)** El promedio diario es el área en azul oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea azul gruesa representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)



El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, prácticamente inodoro e insípido, no irritante. Se encuentra en el aire ambiente y en interiores, es el resultado de la oxidación incompleta del carbono en la combustión.

Puede ser generado por fuentes naturales (incendios, volcanes) y por actividad humana, la fuente antropogénica más importante es el automóvil, donde podemos observar sus emisiones a través del tubo de escape. Adicionalmente, en algunas viviendas, donde el uso de madera para cocción de alimentos o en chimeneas, y hornos u otros aparatos a gas que no funcionan adecuadamente son fuentes de CO. Este contaminante también se forma a partir de compuestos secundarios por la oxidación de hidrocarburos provenientes de emisión antropogénica y biogénica, así como especies que contienen carbón incluyendo aldehídos y alcoholes (U.S. EPA, 2010). El monóxido de carbono se usa en la industria para sintetizar una variedad de compuestos como anhídrido y ácido acético, policarbonatos, ácido acético y policetona.

De acuerdo con el último Inventario de emisiones 2018, la mayor emisión de CO en la Zona Metropolitana del Valle de México es ocasionada por fuentes móviles con un aporte del 94.6 % (SEDEMA, 2021). El evento extraordinario de la pandemia modificó el comportamiento del CO en donde se observa una reducción considerable en sus concentraciones, debido a que su principal fuente de emisión son los vehículos.

En 2020 el promedio anual del contaminante fue de 0.32 ppm, 16 % menos que el promedio en 2019 de 0.38 ppm, calculado con las mismas estaciones, y es el valor más bajo desde 1986. El promedio de las estaciones en la Ciudad de México fue de 0.33 ppm, mientras que en la zona conurbada fue de 0.32 ppm.

En cuanto al promedio horario, el máximo fue de 4.60 ppm en la estación Nezahualcóyotl (NEZ) el 10 de enero a las 09:00 h, ese día se registró capa de mezcla baja e inversión térmica, esto provocó que también en los sitios Santiago Acahualtepec (SAC) y MER, se presentaran valores altos, de 4.00 ppm y 3.10 ppm, respectivamente. El máximo del promedio móvil de 8 horas fue de 2.48 ppm durante el 9 de enero en SAC.

En la distribución espacial (**Figura 3.7)**, se observó que la mayor concentración se registró en SAC, ubicada cerca de un mercado; en MER y San Agustín (SAG) que están próximas a vialidades importantes, así como NEZ y TLA, que están cerca de calles con tránsito vehicular. Los promedios mínimos en la Ciudad de México se registraron en las estaciones PED (0.25 ppm) y SFE (0.24 ppm), ubicadas en zonas residenciales, mientras que el mínimo en el Estado de México fue en el sitio Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 0.15 ppm, dicha estación se ubica en una zona rural predominantemente boscosa del municipio de Ocoyoacac.

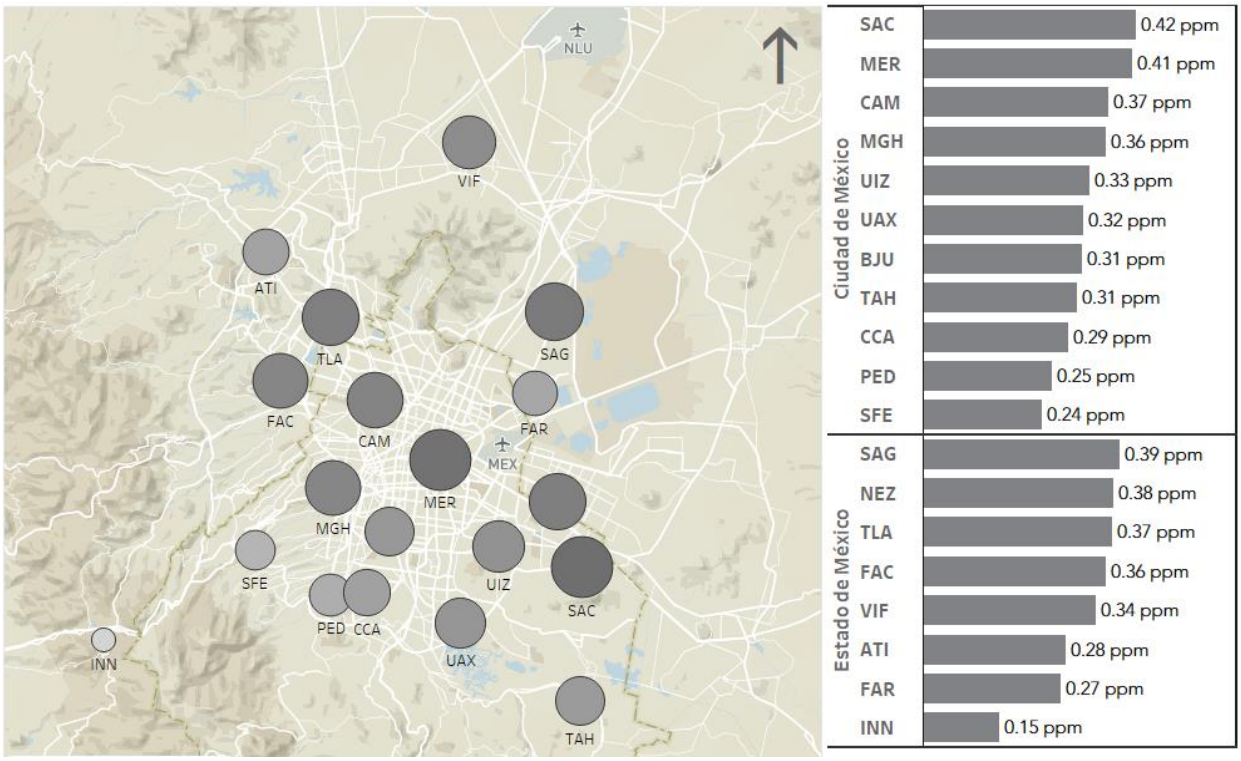


Figura 3.7. Promedio anual de CO por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad.

El comportamiento temporal (**Figura 3.8a**) del contaminante tiene un patrón estacional definido, ya que durante el invierno se presenta la concentración más alta, cuando la dispersión de los contaminantes es deficiente por el incremento de inversiones térmicas en la superficie y la altura de la capa límite. En la época de lluvias, lo cual coincide con el periodo vacacional de verano y, en consecuencia, el flujo vehicular se reduce, los niveles de CO disminuyen significativamente, en específico de junio a octubre.

En 2020, el máximo del promedio mensual (**Figura 3.8b**) fue durante enero y diciembre, con 0.43 ppm, mientras que los mínimos fueron en junio con 0.23 ppm y abril con 0.25 ppm, seguidos por mayo y septiembre con 0.27 ppm, al comparar abril y mayo de 2019 con 2020, se encontró una reducción del 24% y del 23%, respectivamente. Este comportamiento fue consecuencia directa de la pandemia y la suspensión de actividades no esenciales que ocasionó una disminución del flujo vehicular en toda la ZMVM.

En el comportamiento por día de la semana (**Figura 3.8c**), se observó que el domingo obtuvo el mínimo con 0.28 ppm, lo cual es congruente con años pasados. Por el contrario, el sábado cambió su comportamiento, este día tenía una reducción de concentración similar al domingo; pero durante 2020, su promedio y el de días laborales, es prácticamente igual, entre 0.32 y 0.34 ppm. Los días de la semana que registraron el promedio máximo fueron martes y miércoles; sin embargo, como se mencionó, la diferencia entre los días laborares y el sábado no fue estadísticamente significativa (α=0.05).

El perfil horario del CO es bimodal, con un pico pronunciado por la mañana, de 08:00 a 09:00 h, y otro de menor magnitud en la noche, de las 20:00 a 22:00 h, mientras que la concentración más baja del día fue entre las 14:00 y 16:00 h (**Figura 3.8d**). Este comportamiento está relacionado con las emisiones y la evolución de la capa límite. Las estaciones que presentaron los perfiles horarios de mayor concentración fueron SAC, SAG, FAC y MER, los cuales están cerca de vialidades con flujo vehicular constante durante el día y las emisiones aumentan a las horas pico de tránsito.

La estación INN registró el perfil horario de menor concentración y tiene un patrón diferente debido al tipo de entorno del sitio, ubicado en la Sierra de las Cruces a una altitud de 3,080 msnm, además que su objetivo de monitoreo es caracterizar las concentraciones de fondo y evaluar el transporte de los contaminantes. El perfil horario de este sitio no tuvo cambios, ya que el pico se registró a las 10:00 h, cuando la altura de la capa de mezclado alcanza la altitud de la estación, además recibe las contribuciones de la CDMX y de Toluca. En las horas posteriores mantiene una concentración constante e incrementa a las 21:00 h, durante la noche vuelve a decrecer, hasta alcanzar el mínimo de 06:00 a 07:00 h..

El comportamiento horario anual no tuvo un cambio considerable incluso con las fuertes restricciones de actividades durante abril y mayo, ya que desde septiembre comenzó el regreso a la normalidad y se incrementó la movilidad en la ciudad. Por otro lado, si solamente se considera el perfil horario de abril y mayo, en la mayoría de las estaciones desaparece el pico de la noche y solo se observa un ligero incremento en los sitios cercanos a vialidades importantes como: CAM, MER, SAC, SAG, NEZ y VIF. En la comparación de la concentración del perfil horario de abril a mayo con el resto del año, se observó una reducción del 34 %. Esto demostró que la movilidad de la población cambió completamente durante esos dos meses y modificó el comportamiento de los contaminantes.

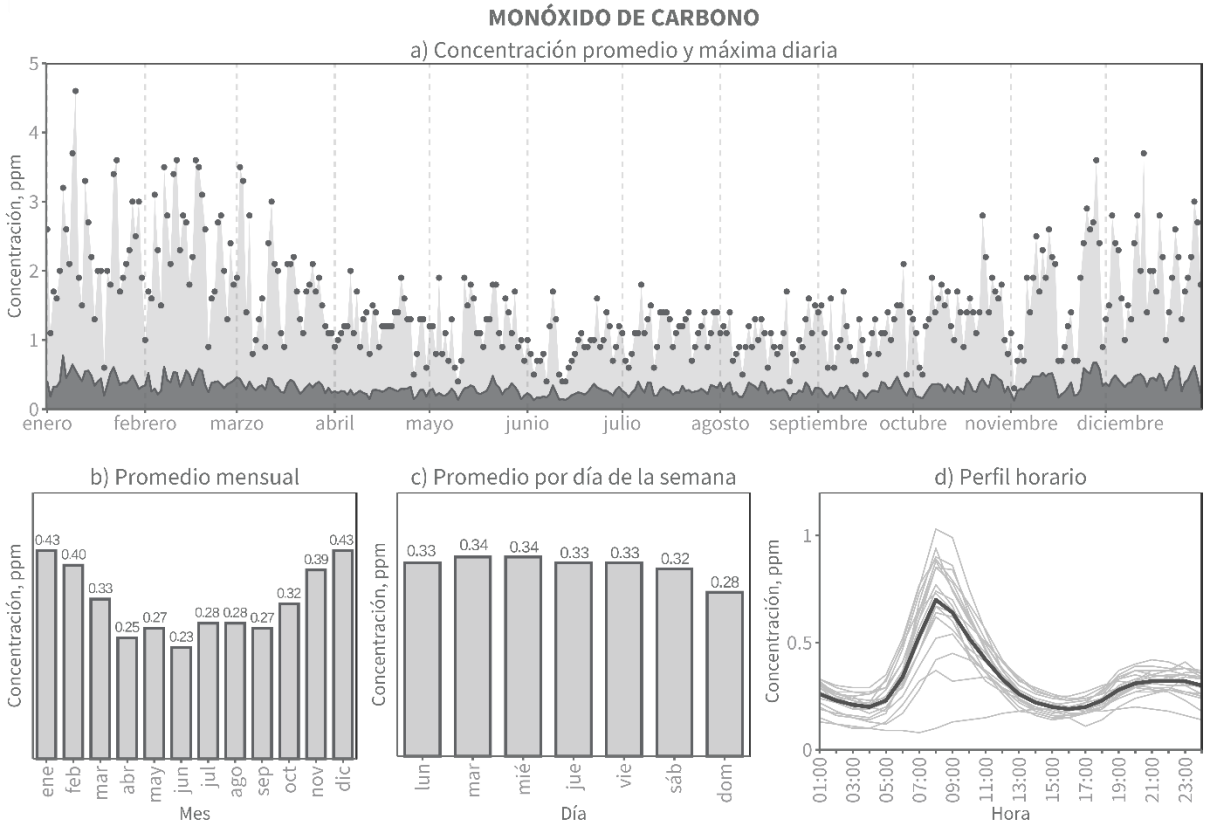
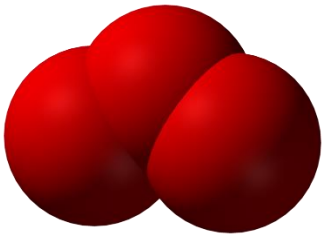


Figura 3.8. Distribución temporal del CO en 2020. **a)** El promedio diario es el área en gris oscuro, los puntos y el área sombreada en gris claro corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea gris oscura representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

OZONO (O_3)



En 1840, el químico alemán *Christian Friedrich Schönbein* le dio el nombre de ozono, de la raíz griega ozein (ὄζειν), "tener olor" debido a su olor característico. El ozono (O_3) es una molécula triatómica formada por átomos de oxígeno. Es un alótropo[3] del oxígeno y es más reactivo que el oxígeno diatómico (O_2). Es un poderoso oxidante que reacciona rápidamente con otros compuestos químicos y es inestable en altas concentraciones. Bajo condiciones atmosféricas normales, el ozono decae a O_2 en un lapso de aproximadamente 30 minutos. Debido a su inestabilidad, es vulnerable a ser destruido por los compuestos naturales que contienen átomos de nitrógeno, cloro y/o bromo. Por su naturaleza altamente oxidante, se usa para desinfectar, purificar y eliminar microorganismos patógenos como virus, bacterias, hongos, moho y esporas. A diferencia de otros desinfectantes, el O_3 no deja residuos químicos, debido a que es un gas inestable y se descompone rápidamente en oxígeno por efecto de la luz, calor y choques electrostáticos.

El O_3 es un componente natural de la atmósfera que se presenta en bajas concentraciones y es indispensable para la vida. La mayor cantidad de ozono se encuentra en la parte superior de la atmósfera, a más de 20 km de la superficie, en una región de la estratósfera llamada **ozonósfera**, donde se concentra más del 90% del ozono atmosférico y forma una capa que limita la radiación ultravioleta proveniente del Sol.

A nivel de la superficie (troposfera), el O_3 es un contaminante del aire y en altas concentraciones provoca efectos nocivos en la salud humana, las plantas y los animales, además contribuye al calentamiento global. La mayoría del O_3 en la tropósfera se forma cuando los óxidos de nitrógeno (NOx), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en presencia de luz solar.

Las fuentes antropogénicas más importantes de los precursores de O_3 son las emisiones vehiculares, las emisiones industriales y los solventes químicos. Estos precursores se originan en áreas urbanas; sin embargo, los vientos pueden arrastrarlos por varios kilómetros, lo que provoca incrementos en la concentración de ozono en regiones menos pobladas.

[3] **Alotropía:** propiedad de poseer diferentes estructuras atómicas o moleculares. Las moléculas formadas de un solo elemento y con distinta estructura molecular se llaman alótropos.

En 2020, el promedio anual calculado con las estaciones de la **Tabla 3.1** fue de 31.3 ppb, este valor fue muy similar al 2019 (31.2 ppb), solo hubo 0.1 ppb de diferencia. El promedio anual de los máximos diarios fue de 74.0 ppb, ligeramente menor al de 2019 que registró 75.8 ppb, esto fue una leve reducción del 2 %. Por otro lado, si sólo se comparan los promedios de los máximos diarios de abril y mayo del 2020 con los mismos meses del 2019, se determinó una reducción del 3 % y 4 %, respectivamente. Estas disminuciones fueron importantes ya que las concentraciones máximas son determinantes para causar eventos de alta contaminación. Un análisis de los máximos diarios durante abril y mayo, se puede consultar en el **Capítulo 6** de este informe.

En la distribución espacial, las estaciones ubicadas al sur de la Ciudad de México reportaron mayores concentraciones, esto es debido, principalmente, al transporte de precursores (NOx y COV) ocasionado por los vientos predominantes desde el norte, en las primeras horas de la tarde reaccionan en presencia de radiación solar y el O_3 se acumula e incrementa en el sur. En la **Figura 3.9** se presenta el número de horas que superaron una concentración horaria de 95 ppb por estación de monitoreo.

Se observó que los sitios ubicados al sur, con excepción de BJU, registraron el mayor número de horas: Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con el máximo de 355 horas, seguida de Pedregal (PED) con 311 horas. Las estaciones UAM-Xochimilco (UAX), Santa Fe (SFE), UAM-Iztapalapa (UIZ) y Miguel Hidalgo (MGH), registraron más de 240 horas. En la mayoría de estos sitios, se observó un incremento en el número de horas, excepto en PED, en la cual disminuyó un 20 % con respecto al dato de 2019 (389 horas). Los mínimos del conteo de horas se presentaron en las estaciones INN (en zona boscosa) con 31 horas, Atizapán (ATI) al noroeste de la ciudad con 27 horas, Montecillo (MON) en zona semirrural tuvo 24 horas y San Agustín (SAG) al noreste de la ciudad presentó 19 horas; en estos cuatro sitios también hubo una reducción en el número de horas con respecto al 2019, del 62 %, 23 %, 74 % y 41 %, respectivamente. En el caso de INN, una estación que evalúa el transporte de contaminantes desde la zona urbana hacia los límites de la ciudad, se observó una reducción de contaminantes trasladados a esta región, especialmente en la frecuencia y duración de los valores de concentración de O_3 superiores al límite de 95 ppb.

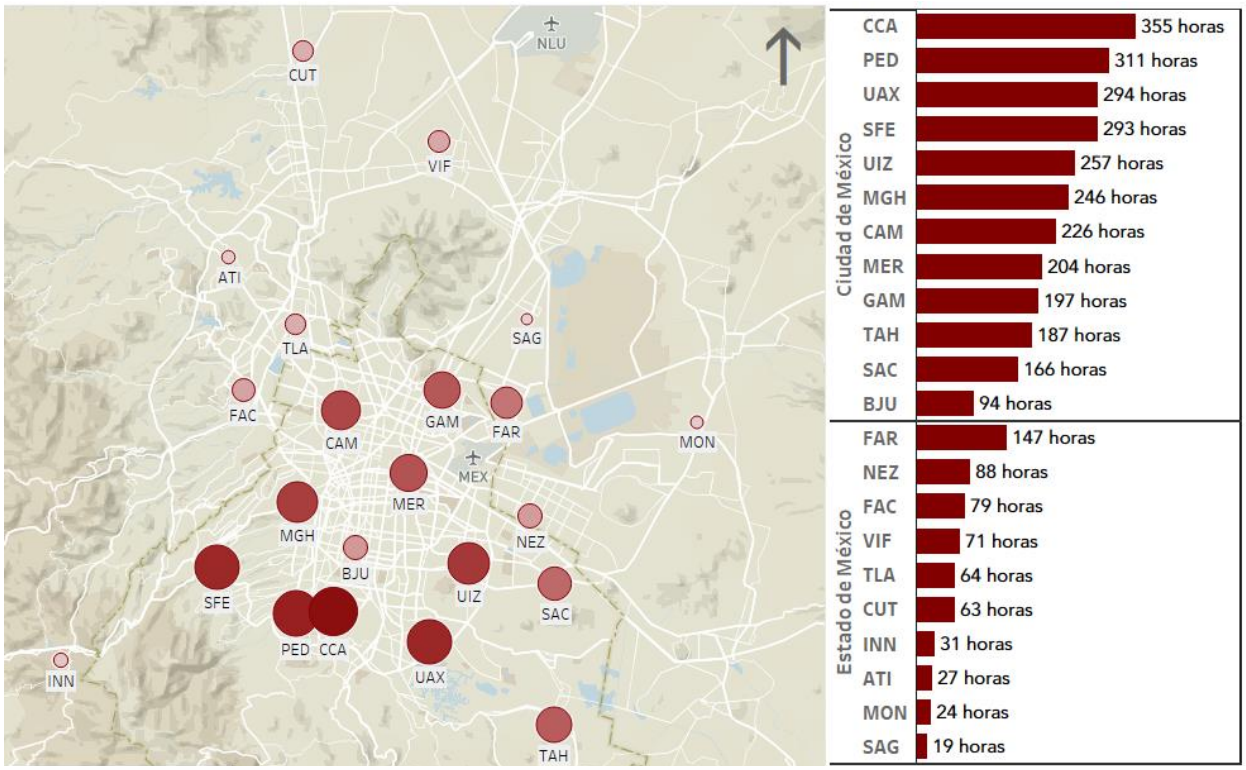


Figura 3.9. Número de horas con concentración horaria de O_3 > 95 ppb por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del número de horas y **b)** las gráficas de barras corresponden al conteo de horas dividido por entidad.

La meteorología tiene un papel fundamental en la formación de O_3, especialmente de marzo a junio, este periodo se ha definido como la **temporada de ozono** porque se favorece la formación y acumulación de las concentraciones de ozono. Las condiciones meteorológicas características en esta temporada incluyen: temperatura elevada, intensa radiación solar, baja humedad y mayor frecuencia de sistemas anticiclónicos que causan estabilidad atmosférica, vientos débiles y cielos despejados.

La concentración horaria máxima del 2020 se presentó el 11 de noviembre en la estación CCA con 159 ppb, este valor declaró la única contingencia de ozono en el año (ver **Capítulo 4**), el máximo del promedio móvil de 8 horas se registró en el mismo día, pero en el sitio SFE con 117 ppb. Es importante mencionar que, debido a restricciones de la pandemia, en la temporada de ozono no se presentaron valores superiores a 154 ppb para declarar contingencia.

Normalmente, los meses con los valores más altos de ozono son marzo, abril y mayo, mientras que, durante 2020 fueron abril y mayo seguidos de junio, marzo y octubre. El promedio en abril 2020 fue 43.4 ppb y fue el segundo más alto desde 2010, el primero es 2019 con 44.6 ppb. El mes de mayo tuvo 45.6 ppb, lo que corresponde al tercer promedio más alto desde 2010, superado por 2017 y 2019 que registraron ambos 46.0 ppb (**Figura 3.10b**). En este año, el promedio mensual de junio, julio, octubre y noviembre fueron mayores a los que se registraron desde 2015. Se presentaron diversos factores que influyeron en el incremento de la concentración del O_3 en la segunda mitad del año, en octubre 2020 se registró una anomalía positiva de temperatura (1.8 °C) por encima del promedio 1981-2010, por lo que fue el tercer octubre más cálido históricamente desde 1953, así mismo, de agosto a octubre fueron más secos por disminución en lluvias, esto ocasionó un incremento del 15.09 % en la huella de sequía a nivel nacional. La precipitación en octubre 2020 fue de 20.1 mm y comparada con el octubre del 2019 que tuvo 86.8 mm, hay una reducción del 76 % para la Ciudad de México.

En la distribución por día de la semana (**Figura 3.10c**), los máximos de concentración fueron en domingo con 32.5 ppb y sábado con 31.0 ppb, esto es un comportamiento típico en la ZMVM y se le conoce como **efecto de fin de semana** (de Foy et al., 2020; Sicard et al., 2020b). Este fenómeno está relacionado con la disminución de emisiones de NOx provenientes de vehículos durante los fines de semana, esto hace que los COV predominen en la producción de ozono y, en consecuencia, la concentración de O_3 aumenta. Lo anterior ocurre debido a que en la ZMCM mayormente se tiene un **régimen sensible a COV**, en el cual la formación de O_3 depende más de estos compuestos y aunque los NOx estén presentes en el aire, estos no impactan significativamente la formación o destrucción del O_3. Este régimen sensible a COV es característico de zonas urbanas, donde los NOx no incrementan el O_3, por el contrario, ocurre un proceso de titulación con las emisiones frescas de NOx y disminuyen la concentración de O_3 durante las primeras horas de la mañana y en la noche. Durante la pandemia, ocurrió un comportamiento similar al efecto de fin de semana, ya que en varios artículos a nivel mundial se encontró que durante los periodos en los que la restricción de actividades fue mayor, se registró un incremento de O_3 (Le et al., 2020; Sicard et al. 2020; Sokhi et al., 2021; Rathod et al., 2021; Vega et al., 2021), especialmente en las ciudades que son limitadas por COV como la Ciudad de México.

El perfil horario del O_3 (**Figura 3.10d**) tiene un comportamiento característico con un pico entre las 14:00 y 16:00 h, mientras que el mínimo se presentó a las 07:00 h. El O_3 por su origen fotoquímico presenta su concentración máxima en las horas de mayor intensidad solar, por el contrario, la concentración disminuye durante la noche

cuando la producción fotoquímica termina y ocurre la descomposición del O_3, pero no se destruye por completo y el O_3 remanente que se formó durante el día, se suma a la contaminación del día siguiente. Durante las primeras horas de la mañana cuando las recientes emisiones vehiculares reaccionan con el O_3 residual se reduce su concentración. Durante abril y mayo del 2020, la curva del perfil horario anual cambió y el decremento de la mañana fue más lento, se estimó que en años pasados la pendiente de caída en la concentración fue 8 ppb por hora y en 2020 fue de 5 ppb/hora, esto debido a la disminución de las emisiones de NOx durante la pandemia.

En las estaciones ubicadas en la región montañosa, se observan concentraciones elevadas por la noche y madrugada, lo cual está relacionado con las contribuciones del ozono residual diurno y de la concentración de fondo (SEDEMA, 2017).

El perfil horario de la estación INN no presentó la disminución a las 07:00 h, sino una concentración similar a la madrugada, esto es debido a que está ubicada en la zona montañosa y rural, alejada de emisiones recientes del tránsito vehicular que consuman el O_3 residual.

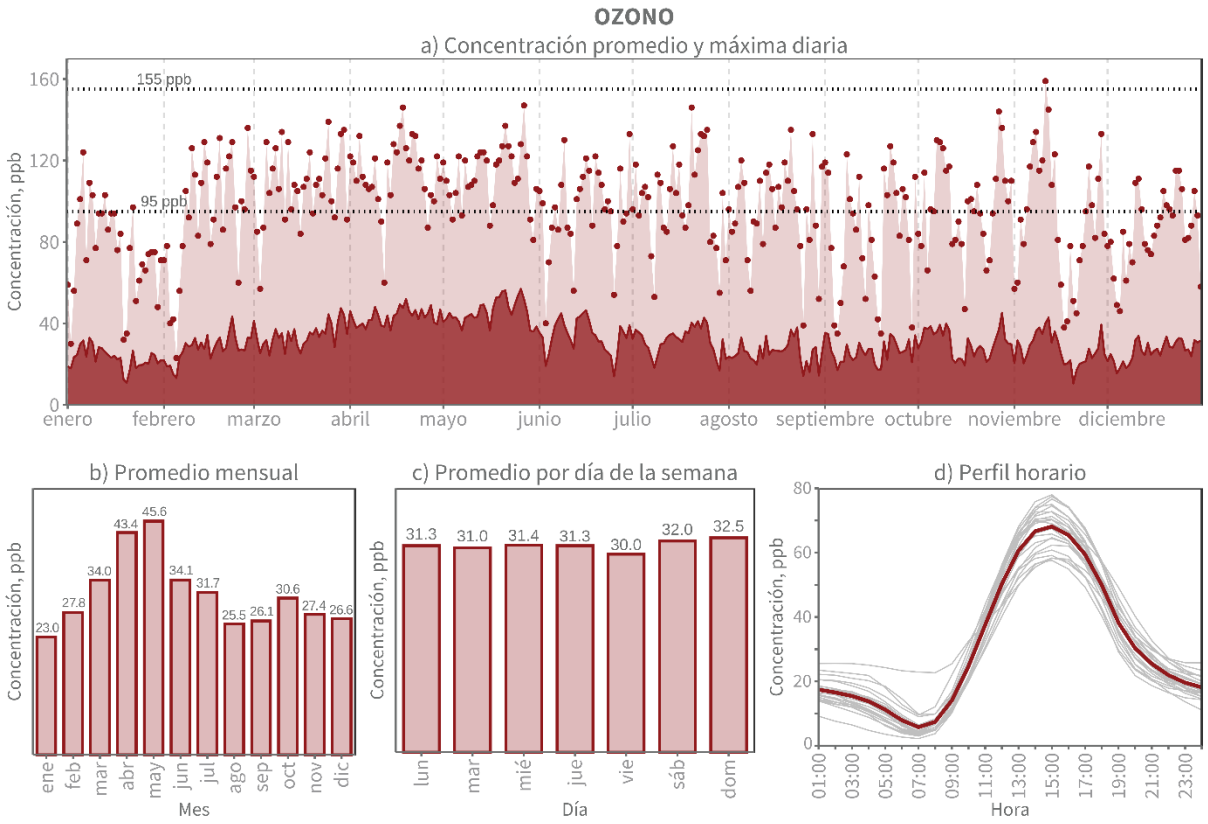


Figura 3.10. Distribución temporal del O_3 en 2020. **a)** El promedio diario es el área en rojo oscuro, los puntos y el área sombreada en rojo claro corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea gruesa de color rojo representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada estación de monitoreo.

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

La mezcla de compuestos microscópicos en forma de líquidos y sólidos suspendidos en el aire se les llama partículas suspendidas, aeropartículas y aerosoles. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín, o el humo, son suficientemente grandes y oscuras para distinguirse a simple vista. Por el contrario, existen partículas muy pequeñas y solo pueden ser detectadas mediante el uso un microscopio electrónico.

El tamaño y composición de las partículas son los factores más importantes que determinan su comportamiento, permanencia en la atmósfera, así como sus efectos en la salud de los seres vivos y el ambiente. Las partículas se dividen por su tamaño en tres fracciones:

- **Gruesa:** está compuesta por partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10 µm ($PM_{10-2.5}$).
- **Fina:** incluye partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 µm ($PM_{2.5}$).
- **Ultrafina:** se refiere a las partículas menores a 1 µm (PM_1).

El origen de las partículas es diverso, su tamaño depende del origen, por ejemplo, las más grandes (PM10), pueden provenir de emisiones directas como obras en construcción, caminos sin asfaltar, campos, chimeneas de industrias y casas, incendios, tolvaneras, erupciones volcánicas, el rodamiento y frenado de vehículos, etc. Sin embargo, la mayoría de las partículas se forman en la atmósfera (PM2.5) como resultado de reacciones complejas de compuestos como SO_2 y NOx, contaminantes emitidos por centrales eléctricas, refinerías, industrias y automóviles. Las partículas finas son la causa principal de visibilidad reducida (bruma).

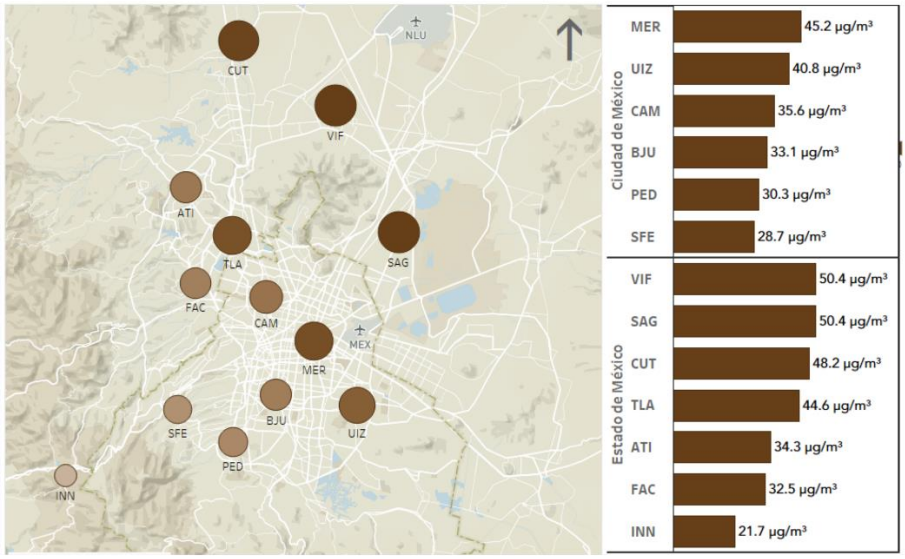
En este año con las restricciones por la pandemia, se observó una reducción en la concentración de partículas alrededor del mundo. El estudio de Sokhi et al. (2021) comparó la concentración de 2015-2019 con 2020 y encontró reducciones significativas entre el 10 y 51 % en las $PM_{2.5}$ durante el cierre de actividades en ciudades de la India, de China, en Sevilla, Moscú, Montreal, Ciudad de México, Quito y Lima. En PM_{10}, se estimó una reducción en Asia del 40 al 75 %, en Australia fue del 20 al 30 % y en Sudamérica fue del 20 al 50 %. En el estudio de Vega et al. (2021), se analizaron datos de Londres, Delhi y Ciudad de México, se compararon los niveles de partículas del periodo de 2017-2019 con 2020.

Las reducciones estimadas para la Ciudad de México fueron del 20 % en $PM_{2.5}$ y 16 % en PM_{10}. En Londres , fue del 25% en $PM_{2.5}$ y 20% en las PM_{10}, mientras que en Delhi la reducción en $PM_{2.5}$ fue 50% y 40 % en PM_{10}.

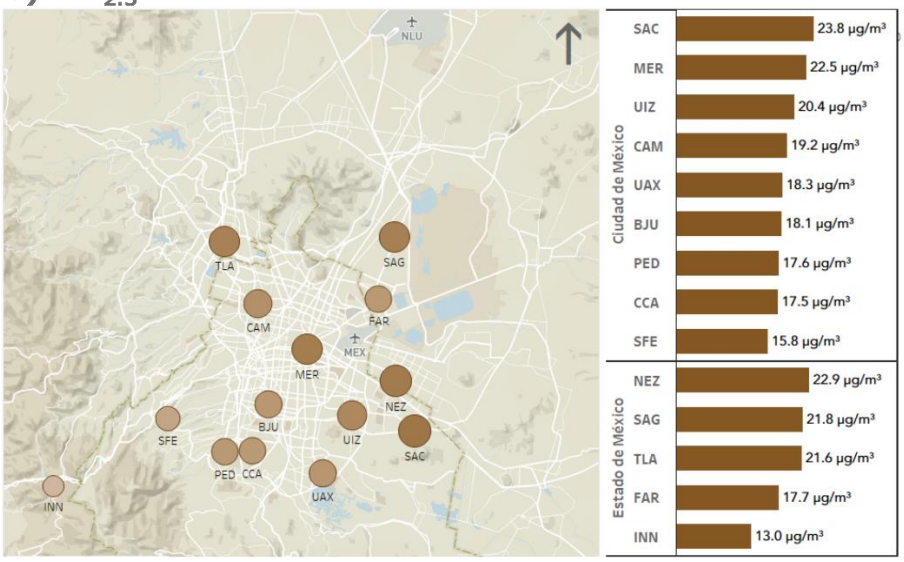
Es importante mencionar que, en esta sección corresponden a los resultados de las mediciones continuas de partículas, realizadas por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), que mide las tres fracciones: PM_{10}, $PM_{2.5}$ y $PM_{10\text{-}2.5}$, estas últimas son la diferencia entre PM_{10} y $PM_{2.5}$. Los promedios anuales de las tres fracciones, con los sitios de la **Tabla 3.1**, fueron 36, 17 y 19 µg/m^3 para PM_{10}, $PM_{10\text{-}2.5}$ y $PM_{2.5}$, respectivamente. Estos promedios fueron menores a los reportados en 2019 (42 µg/m^3 en PM_{10}, 20 µg/m^3 en $PM_{10\text{-}2.5}$ y 22 µg/m^3 en $PM_{2.5}$), con una disminución del 14, 15 y 16 %, respectivamente. La concentración de partículas fue mayor en los sitios del Estado de México que en la Ciudad de México, esto es congruente con años pasados y se debe a que hay más fuentes de emisiones primarias en el Estado de México.

En la distribución espacial (**Figura 3.11**), las concentraciones más altas de PM_{10} y $PM_{10\text{-}2.5}$ fueron en el Estado de México, en VIF y SAG el máximo de PM_{10} fue 50.4 µg/m^3, mientras que en $PM_{10\text{-}2.5}$, su máximo fue en SAG con 28.6 µg/m^3. Lo cual estuvo influenciado por la contribución de partículas del tránsito vehicular, actividades agrícolas, así como polvo de zonas erosionadas que es levantado por el viento. En la Ciudad de México, la estación Merced (MER) tuvo las concentraciones máximas de las tres fracciones con 45.2 µg/m^3 en PM_{10}, 22.5 µg/m^3 para $PM_{2.5}$ y 22.8 µg/m^3 en $PM_{10\text{-}2.5}$, debido a que el sitio está cerca de una vialidad importante con tránsito vehicular alto. Los sitios al norte de la ZMVM registraron los valores más altos para PM_{10} y $PM_{10\text{-}2.5}$, mientras que en las $PM_{2.5}$, fueron en estaciones al oriente y sureste de la ciudad, en la estación Santiago Acahualtepec (SAC) con 23.8 µg/m^3, seguida de Nezahualcóyotl (NEZ) con 22.9 µg/m^3, estos valores tuvieron contribución de incendios registrados en los primeros meses del año. Los máximos del promedio de 24 h fueron el 1 de enero en VIF con 177 µg/m^3 en PM_{10}, ocasionado por la pirotecnia en año nuevo; el 21 de mayo en UIZ con 63 µg/m^3 para $PM_{2.5}$, este día varios sitios como SAC, NEZ y CCA, superaron 50 µg/m^3, debido a un incendio en el Tepozteco, Morelos, el cual inició el 19 de mayo y tuvo una duración de casi 7 días, además, en el centro del país persistió un sistema de alta presión que ocasionó estabilidad atmosférica; el máximo de $PM_{10\text{-}2.5}$ fue el 31 de diciembre en SAG con 63 µg/m^3 relacionado con las festividades de fin de año. El máximo horario en las PM_{10} fue el 29 de abril en VIF con 615 µg/m^3, causado por un incendio en la sierra de Guadalupe. En $PM_{2.5}$ el máximo horario fue el 12 de diciembre en UIZ con 189 µg/m^3, debido a un sistema de alta presión que causó baja dispersión. Por último, el máximo horario de las $PM_{10\text{-}2.5}$ fue el 29 de abril en SAG con 369 µg/m^3, ocasionado por el incendio en la sierra de Guadalupe.

a) PM_{10}



b) $PM_{2.5}$



c) $PM_{10-2.5}$

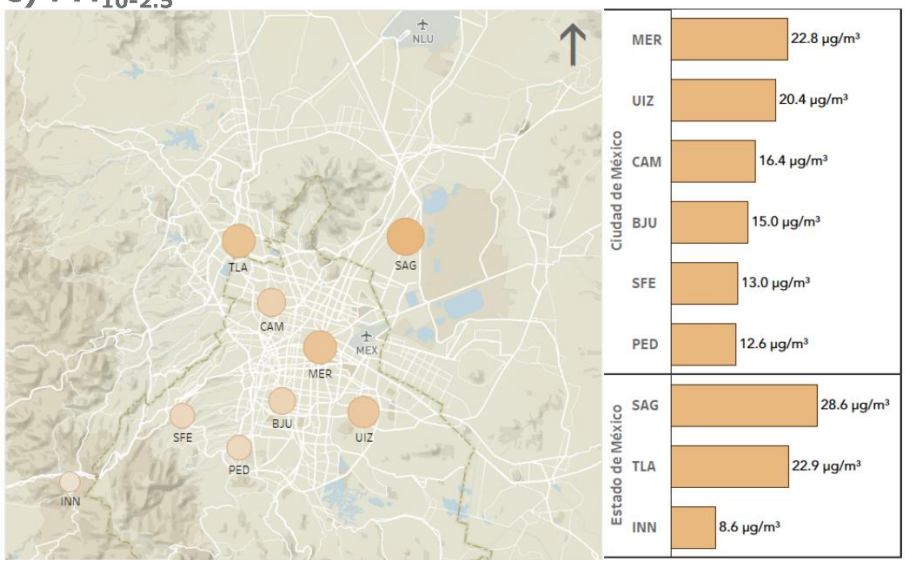


Figura 3.11. Promedio anual por sitio de monitoreo para: **a)** PM_{10}, **b)** $PM_{2.5}$ y **c)** $PM_{10-2.5}$. En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad.

En las series de tiempo (**Figuras 3.12a, 3.13a** y **3.14a**), se observa una estacionalidad en partículas, en PM_{10} se presentó menor concentración de junio a septiembre (época de lluvia), mientras que en las $PM_{10-2.5}$, la reducción se observó desde mayo (relacionado con las restricciones de pandemia) hasta septiembre y en las $PM_{2.5}$, su disminución se observó de junio a mediados de septiembre, la reducción no es tan marcada como en la fracción gruesa debido al aporte de contaminantes secundarios.

Normalmente, en los meses fríos presentan las concentraciones más altas, debido a las condiciones de estabilidad atmosférica y la disminución de la altura de la capa de mezclado. En 2020, los promedios mensuales máximos para PM_{10} se presentaron en marzo con 50.3 $\mu g/m^3$ seguido de febrero (46.5 $\mu g/m^3$) y diciembre (45.6 $\mu g/m^3$), marzo fue más alto porque presentó varios eventos de incendios, así como vientos fuertes, lo que provocó levantamiento de polvo e incremento en la concentración. En el caso de las $PM_{2.5}$, los promedios mensuales máximos se observaron en mayo con 25.1 $\mu g/m^3$, abril con 24.2 $\mu g/m^3$ y marzo con 22.8 $\mu g/m^3$, este incremento en los meses calientes se relacionó a una mayor actividad fotoquímica en la atmósfera que contribuyó a la producción de aerosoles secundarios. En la fracción gruesa ($PM_{10-2.5}$), los tres primeros meses del año tuvieron los promedios más altos, en febrero fue de 26.8 $\mu g/m^3$, seguido por marzo con 26.3 $\mu g/m^3$ y para enero fue de 22.7 $\mu g/m^3$, lo cual es un comportamiento normal en estas partículas, la diferencia con otros años fue el decremento en mayo con una concentración de 13.6 $\mu g/m^3$, lo que representó una reducción del 36 % con respecto al promedio de los meses de mayo en 5 años anteriores, esto se asocia a la disminución de actividades y movilidad por la pandemia (**Figura 3.12b, 3.13b y 3.14b**).

En el análisis por día de la semana (**Figura 3.12c, 3.13c y 3.14c**), se observó que las PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ presentaron un comportamiento similar al de contaminantes gaseosos (CO y NOx), con los valores más altos de martes a sábado, mientras que los mínimos fueron los lunes y domingos. Estos valores mínimos en lunes se asocian a la reducción de actividades que emiten contaminantes primarios de partículas. En el caso de $PM_{2.5}$, este año su comportamiento presentó un incremento gradual durante los días laborales (excepto el viernes), el cual llega a su máximo en sábado y el mínimo en domingo. Desde 2019, el viernes ha presentado una disminución con respecto al jueves y sábado, este decremento también se ha observado en O_3, lo que puede indicar que los precursores de aerosoles secundarios y de O_3, tienen un origen similar. Es importante mencionar que la concentración de $PM_{2.5}$ fue parecida a lo largo de la semana; sin embargo, sí se observaron diferencias estadísticamente significativas en la mayoría de las estaciones.

En la mayoría de las estaciones, los perfiles horarios de PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ se caracterizaron por dos picos de concentración, el primer máximo entre las 08:00 y 09:00 h, mientras que el segundo fue aproximadamente a las 19:00 h. Este comportamiento es influenciado por emisiones vehiculares, en donde destacan la suspensión de polvos y las emisiones primarias del escape (p. ej., carbono negro). En la tarde, hubo una aportación adicional, proveniente del polvo levantado por el viento, principalmente en la fracción gruesa. El perfil horario de estas partículas fue diferente entre las estaciones localizadas en zonas con variabilidad en el tránsito vehicular (p. ej., Pedregal) y las que se encuentran en áreas afectadas por el transporte de contaminantes (p. ej., Santa Fe, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares), éstas últimas se caracterizaron por una concentración menor en el pico matutino y en algunos sitios este pico no existe.

En el caso de $PM_{2.5}$, el perfil horario se caracterizó por un máximo único entre las 10:00 y las 12:00 h, el cual estuvo asociado principalmente a la formación secundaria de aerosoles inorgánicos (nitratos, sulfatos) y orgánicos (principalmente compuestos con presión de vapor baja y diversos grados de oxidación), aunque hay estaciones como NEZ, FAR y CCA que presentaron un pico también a las 19:00 h, en CCA puede ser debido al arrastre mientras que en NEZ y FAR se tiene un mayor aporte de emisiones primarias a esa hora (**Figuras 3.12d, 3.13d** y **3.14d**).

La concentración de PM_{10} tuvo predominancia de la masa de $PM_{2.5}$, en la mayoría de las estaciones que midieron las tres fracciones simultáneamente. El cálculo de la contribución de las fracciones a la concentración de PM_{10} fue de 41 % de $PM_{10-2.5}$ y 59 % de $PM_{2.5}$, esta contribución de $PM_{2.5}$ fue ligeramente mayor a la observada en 2019 (57%). En 2020, se observaron dos periodos en los que la contribución de $PM_{2.5}$ fue mayor: durante la temporada seca caliente, ocasionando la formación de aerosoles secundarios durante el día, también hay una contribución de los incendios forestales; y en la temporada de lluvia, cuando la humedad del suelo y la lluvia, remueven las partículas gruesas de la atmósfera.

En la **Figura 3.15** se presentan las contribuciones promedio mensual de las fracciones gruesa y fina a la concentración total de PM_{10} para cada una de las estaciones de monitoreo. En términos generales, los sitios ubicados al sur de la Ciudad de México tienen una mayor aportación de la fracción fina, mientras que en las estaciones ubicadas al norte (p. ej., San Agustín - SAG), la contribución de la fracción gruesa fue mayor.

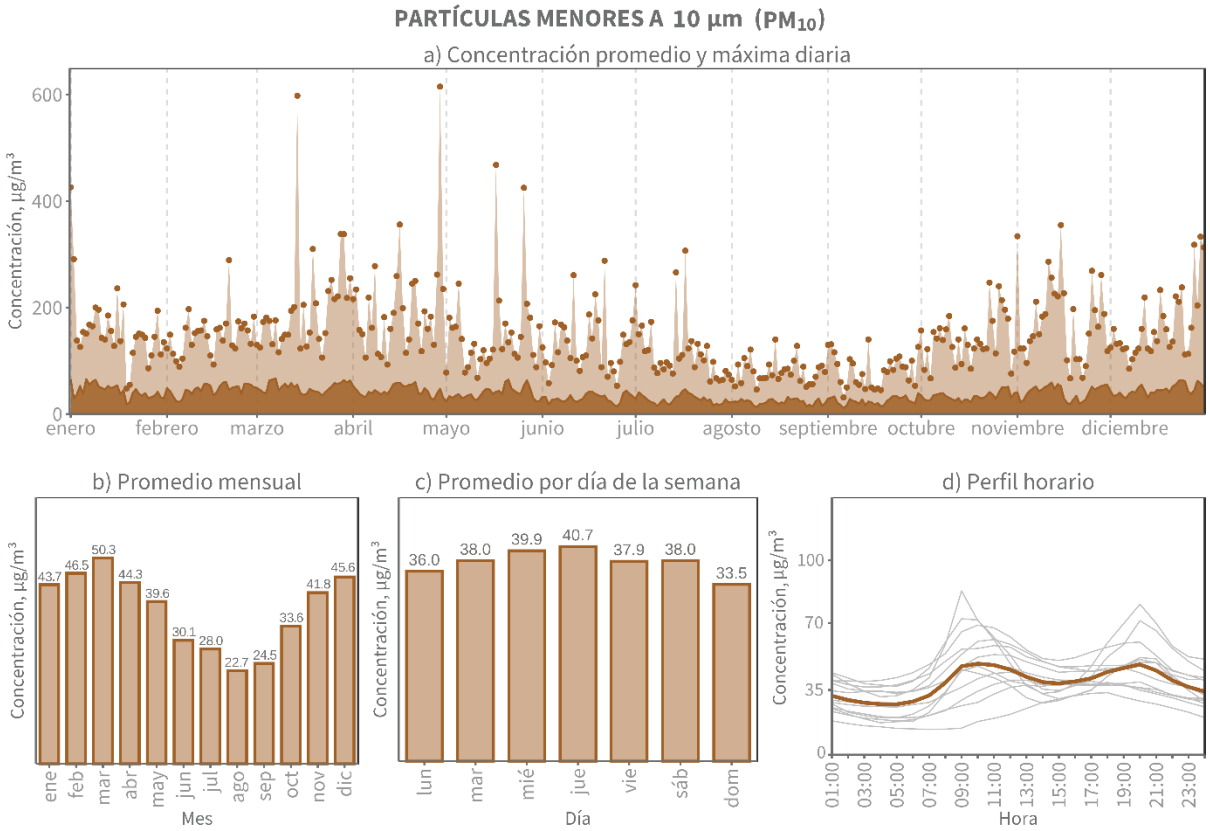


Figura 3.12. Distribución temporal de las PM_{10} en 2020. **a)** El promedio diario es el área en café oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea café oscura representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

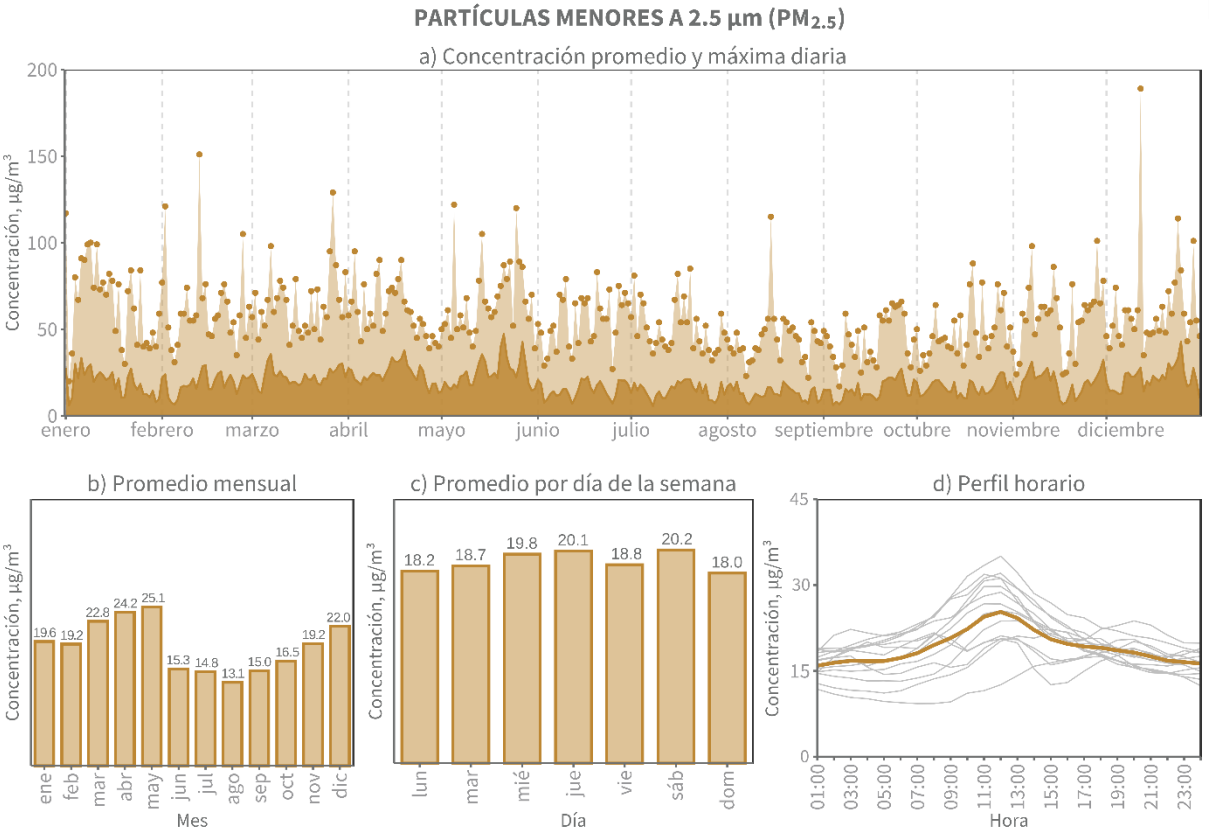


Figura 3.13. Distribución temporal de las $PM_{2.5}$ en 2020. **a)** El promedio diario es el área en café oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea cafe oscura representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

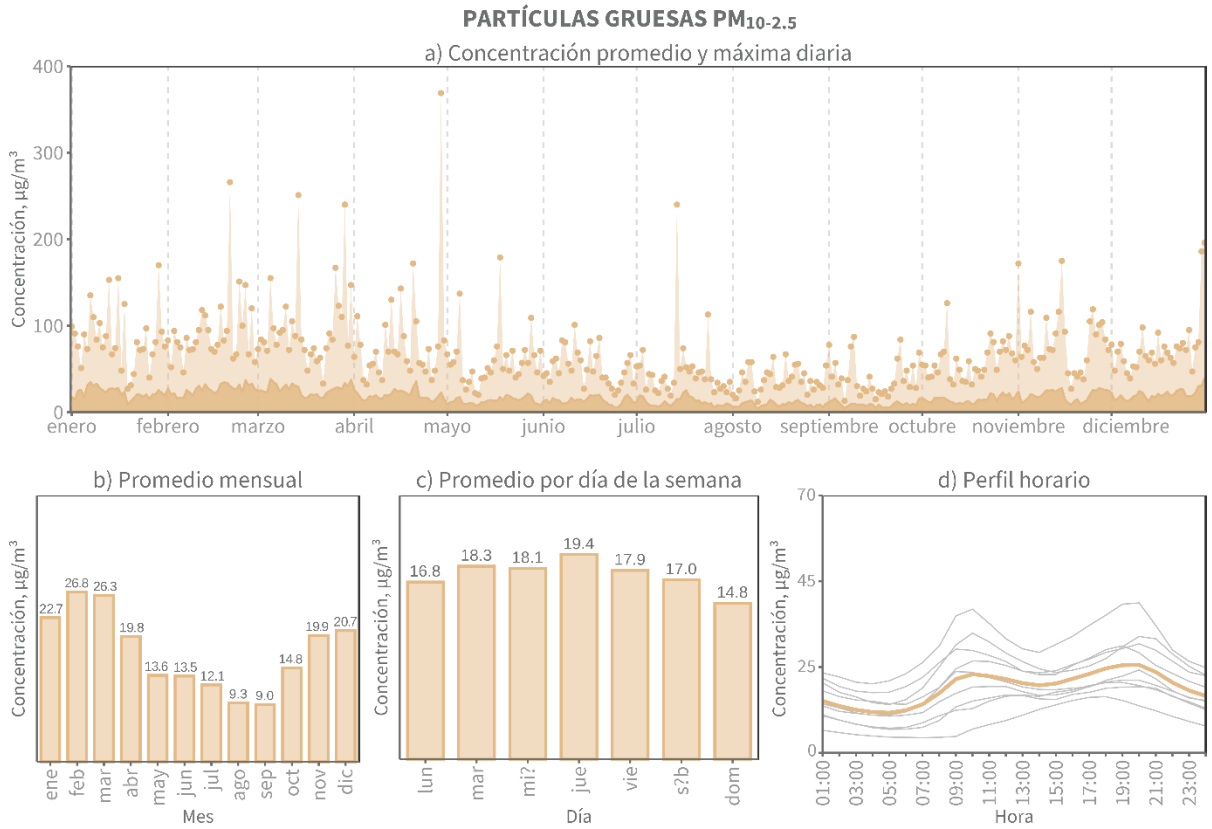


Figura 3.14. Distribución temporal de las $PM_{10-2.5}$ en 2020. **a)** El promedio diario es el área en café más oscuro, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea café oscura representa el promedio con todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario de cada sitio.

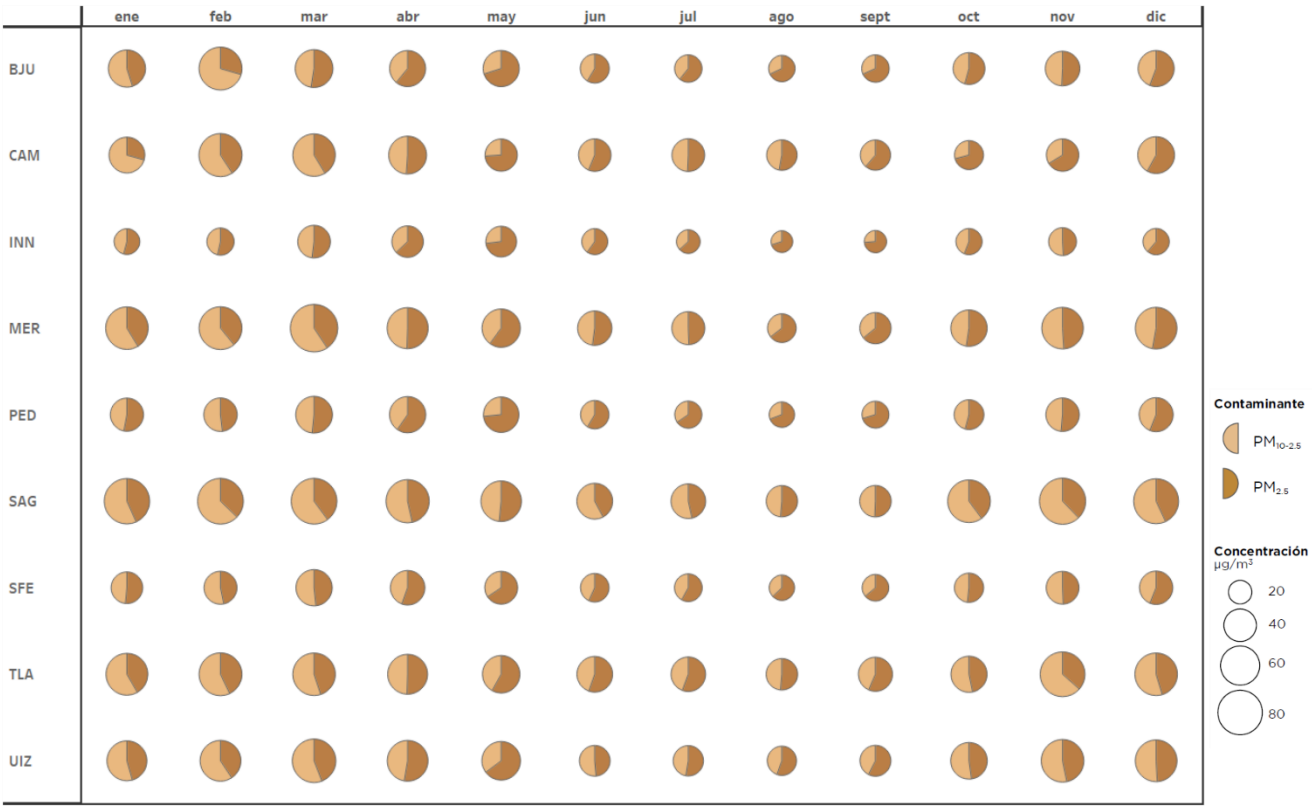
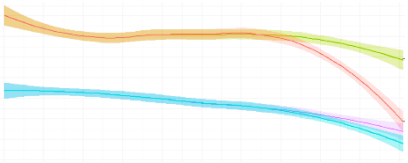


Figura 3.15. Variabilidad mensual de las contribuciones de las fracciones gruesa ($PM_{10-2.5}$) y fina ($PM_{2.5}$) a la concentración total de PM_{10} en las diferentes estaciones de monitoreo de la RAMA.

TENDENCIA



Las redes de monitoreo de la calidad del aire son fundamentales para la evaluación y gestión, de los gobiernos, los encargados de formular políticas y de organismos reguladores. Existen herramientas, como los inventarios de emisiones, usados para observar cambios en los contaminantes; sin embargo, no son un indicador preciso de la concentración de contaminantes, debido a la complejidad de los procesos atmosféricos y las condiciones locales. Por otro lado, los datos de monitoreo, sujetos a un análisis estricto, pueden revelar correlaciones y tendencias de los contaminantes en una región. Esta información es relevante para estimar los efectos de cambios sociales, de infraestructura y políticas de calidad del aire. El análisis de tendencia es una herramienta útil para detectar cambios en los contaminantes y se puede usar como prueba de la eficacia, o ineficacia, de estrategias para la reducción de contaminantes (Lang et al., 2019).

En las series de tiempo históricas (**Figuras 3.16 a 3.23**) se presentan los promedios mensuales de cada contaminante de 1995 a 2020, la desviación estándar y la línea del ajuste de tendencia que utiliza el método LOESS, que es una técnica no paramétrica de regresión ponderada para ajustar una curva suave a través de puntos de un diagrama de dispersión.

La línea de ajuste LOESS muestra que, en 2020 debido a la reducción de las emisiones de CO y NOx, se registró una reducción en estos contaminantes, así como para NO_2, PM_{10} y $PM_{2.5}$. Por el contrario, el O_3 tuvo un ligero incremento en este año, mientras que el SO_2 presenta una tendencia estable desde 2014.

Se puede observar que la tendencia decreciente ha sido consistente con la aplicación de medidas para el control de emisiones y programas de calidad del aire, ya que, desde finales de los noventa, hay reducciones en la mayoría de los contaminantes.

A partir del año 2010, SO_2 tiene una tendencia constante con decrementos ligeros, en NOx y NO_2, no hubo una tendencia definida en los primeros años; sin embargo, desde 2010 se observan ligeras reducciones año con año. Para el CO, hay una tendencia decreciente desde 1995 que continúa hasta el 2020.

En ozono, de 1995 a 2007 se presentó una leve reducción y a partir de 2008, se estabiliza sin cambios significativos, esto es debido a que la formación de este contaminante secundario está influenciada por factores meteorológicos y por la relación de sus precursores.

La tendencia de las partículas suspendidas totales (PST), como contaminante primario, presenta un incremento en 1998 debido a la gran cantidad de incendios forestales que se registraron en ese año, posteriormente, las PST se han reducido paulatinamente y en 2009 se observó un ligero incremento que se relacionó con las mega obras que se realizaron en la CDMX y posterior a esto, vuelve a una tendencia decreciente. Este mismo comportamiento se observa en las PM_{10}, con un incremento en 2011 debido a una gran cantidad de incendios forestales que se registraron en ese año.

Por último, las $PM_{2.5}$ prácticamente se han mantenido constantes con una tenue disminución en los primeros años y de 2018 a 2020 hay un ligero decremento incluso con los incendios forestales que se presentaron en la época seca-caliente del 2019.

Durante 2020, debido a las restricciones de actividades ocasionadas por la pandemia, todos los contaminantes presentaron reducciones en la tendencia, excepto en O_3 y SO_2.

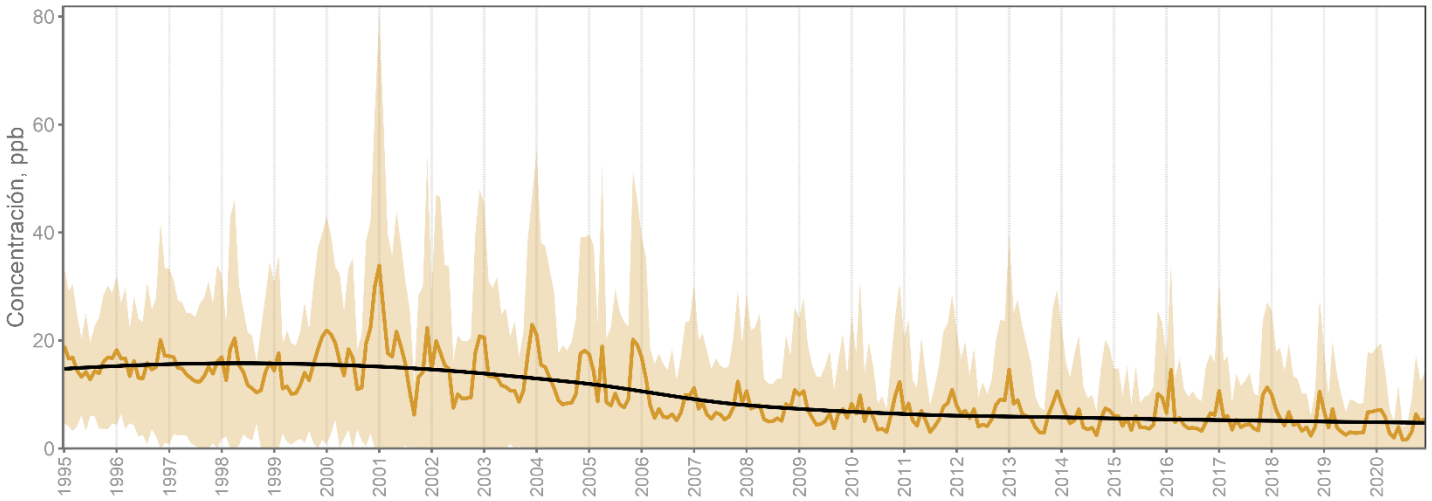


Figura 3.16 Serie de tiempo con promedios mensuales de SO_2 de 1995-2020. La línea amarilla corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en amarillo es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

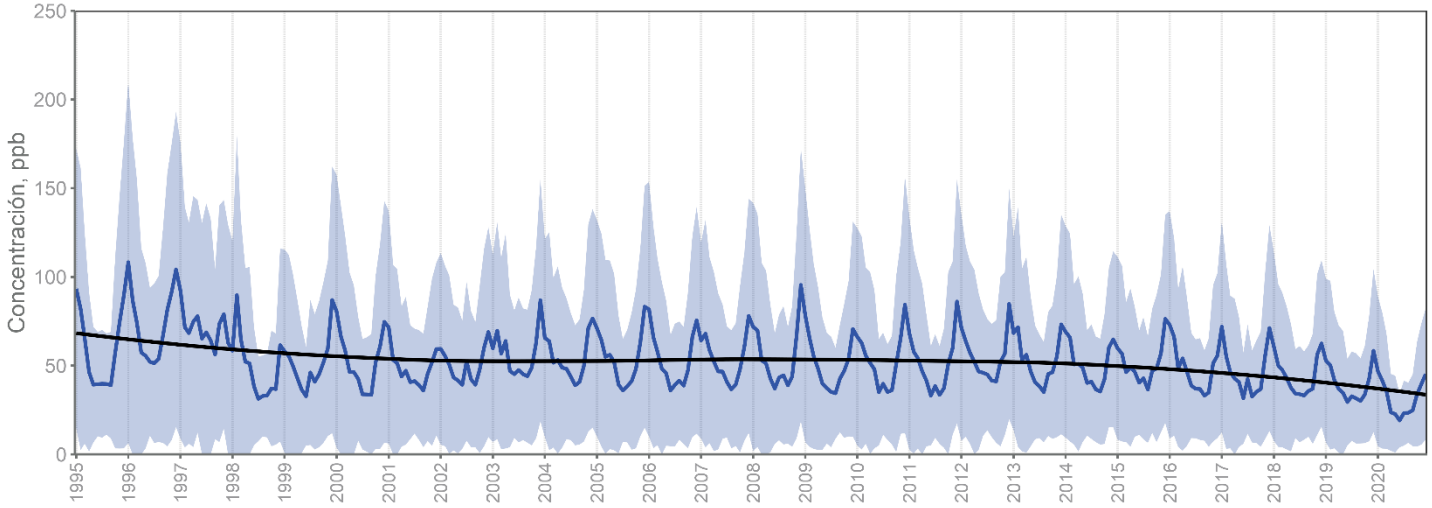


Figura 3.17 Serie de tiempo con promedios mensuales de NOx de 1995-2020. La línea azul corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en azul es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

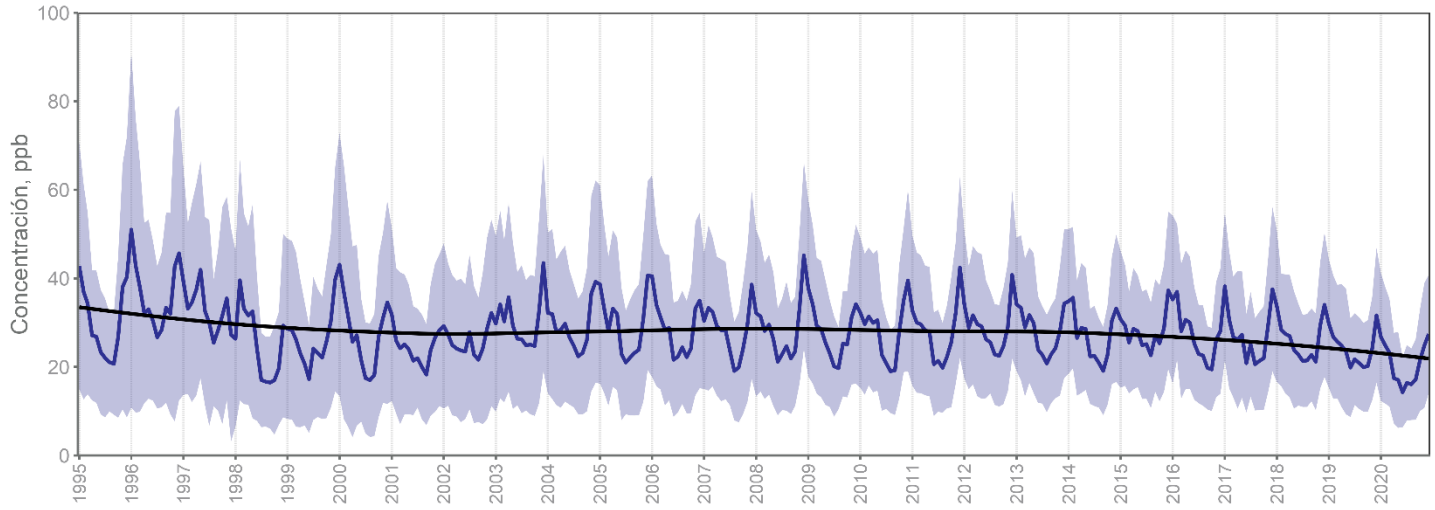


Figura 3.18 Serie de tiempo con promedios mensuales de NO_2 de 1995-2020. La línea azul corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en azul es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

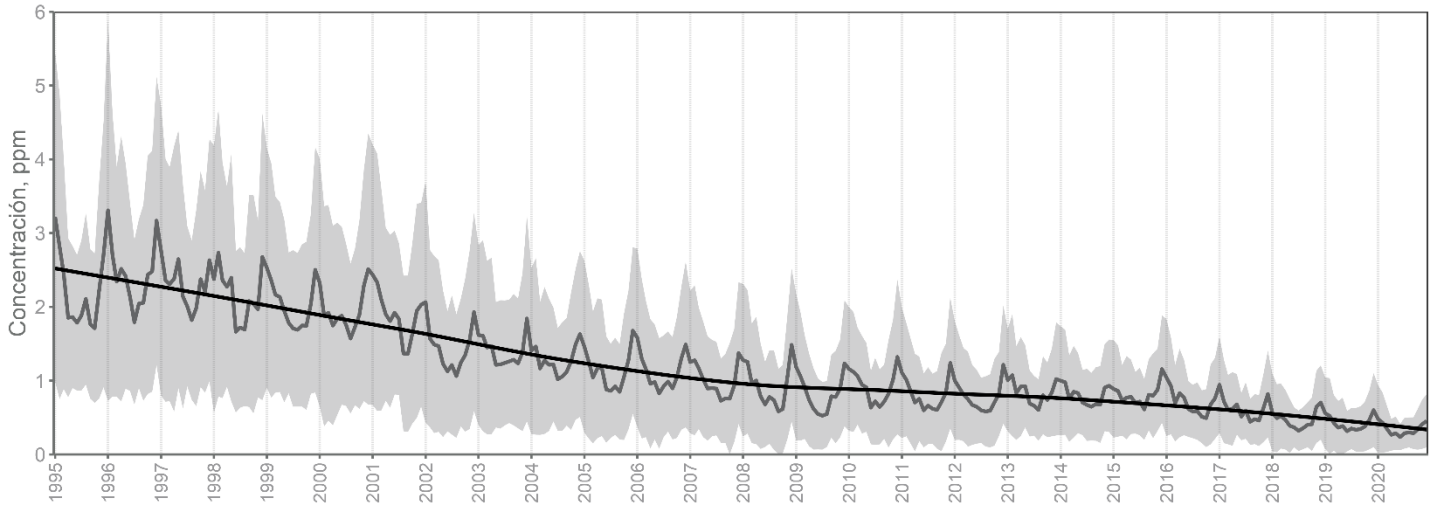


Figura 3.19 Serie de tiempo con promedios mensuales de CO de 1995-2020. La línea gris corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en gris es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

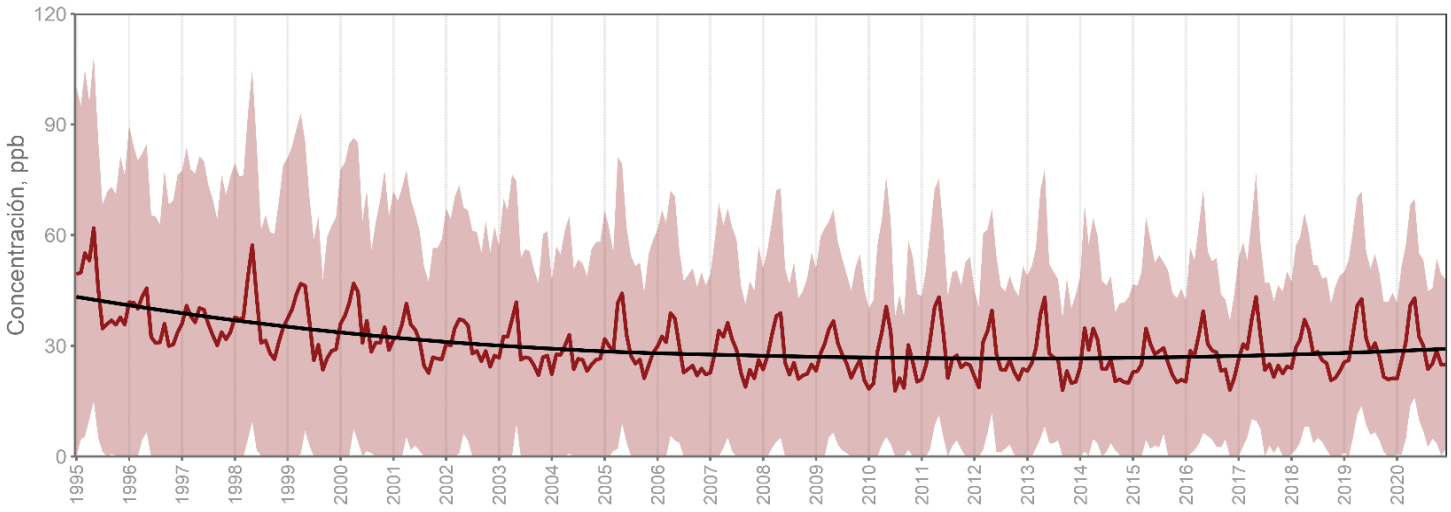


Figura 3.20 Serie de tiempo con promedios mensuales de O_3 de 1995-2020. La línea roja corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en rojo es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

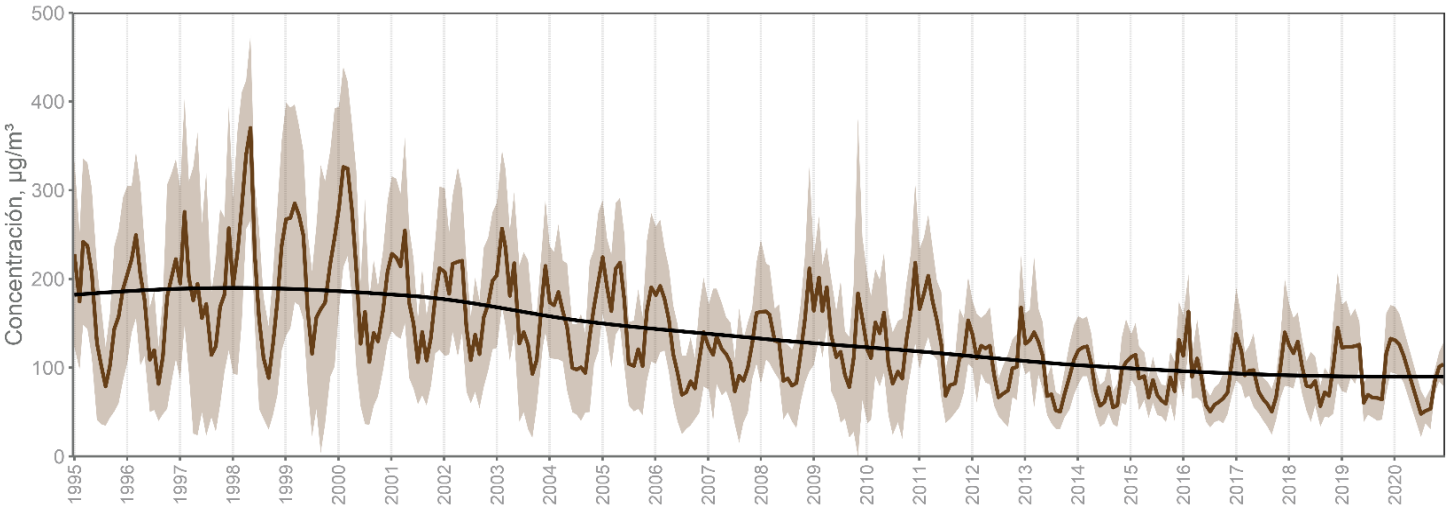


Figura 3.21 Serie de tiempo con promedios mensuales de PST de 1995-2020. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

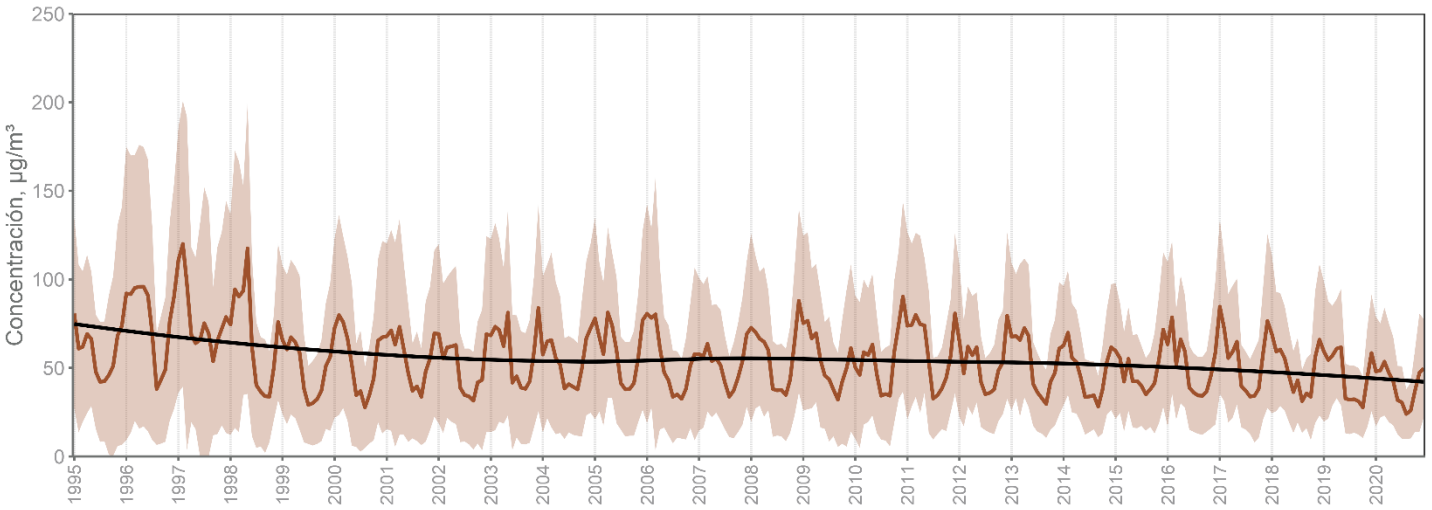


Figura 3.22 Serie de tiempo con promedios mensuales de PM_{10} de 1995-2020. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

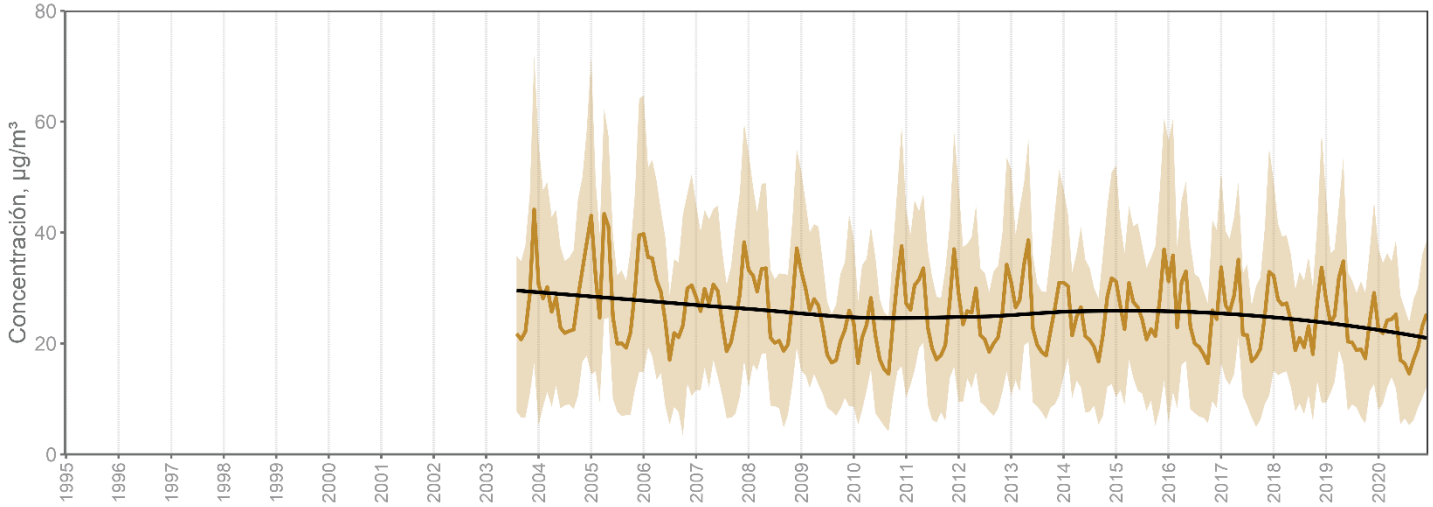


Figura 3.23 Serie de tiempo con promedios mensuales de $PM_{2.5}$ de 2004 a-2020. La línea café claro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones, la región sombreada en café claro es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE

El índice de calidad del aire es una herramienta que los gobiernos usan para informar el nivel de contaminación en el aire ambiente, los riesgos a la salud asociados y las recomendaciones para que la población reduzca su exposición. En 2019, existían alrededor de 34 sistemas de monitoreo de calidad del aire en México, distribuidos en 30 entidades federativas; sin embargo, solamente 15 reportaban un índice de calidad del aire, la mayoría de estos sólo publicaba en el portal de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINAICA) y una minoría lo publicaba en la página web de su entidad. Dichos índices tenían diferencias en nombre, algoritmos de cálculo, criterios de clasificación, mensajes asociados y frecuencia de reporte.

Ante esta situación, en noviembre de 2019, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó la Norma Oficial Mexicana **NOM-172-SEMARNAT-2019**, que establece los lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (**Índice AIRE Y SALUD**), con aplicación obligatoria a partir del 18 febrero de 2020 para los gobiernos estatales o municipales responsables del monitoreo de la calidad del aire.

Comparación del Índice AIRE Y SALUD y el anterior Índice de calidad del aire

El Índice de Calidad del Aire NADF-009-AIRE-2017, se construyó con base en el algoritmo de la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (U.S. EPA) y el valor de 100 puntos del Índice es equivalente al límite de la NOM para cada contaminante y si se supera de ese valor, la calidad del aire se considera Mala. Mientras, que en el Índice AIRE Y SALUD, la concentración de cada contaminante criterio se relaciona directamente a una categoría de calidad del aire, a un nivel de riesgo, así como a las respectivas recomendaciones para grupos sensibles y población en general.

En el Índice AIRE Y SALUD, la categoría "Buena" hace referencia al valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005) y la categoría "Aceptable" tiene el valor límite establecido en la NOM de cada contaminante. Debido a que estas categorías están ligadas a la OMS y NOM, los niveles de contaminación en Buena se consideran de bajo riesgo a la salud para la población general, mientras que, para la categoría Aceptable, la población susceptible como adultos mayores, embarazadas, niños y personas con comorbilidades, pueden presentar algún

riesgo a su salud. Cualquier nivel superior a la categoría “Aceptable”, implicaría un riesgo para la salud.

Los rangos de valores de concentración entre ambos índices son diferentes, uno enseguida del otro, por lo que cambia la asignación del color y categoría de calidad del aire (**Figura 3.24 y Figura 3.25**), en algunos contaminantes ciertos intervalos son muy pequeños lo que hace que de forma casi inmediata cambie de una categoría a otra, es importante mencionar que en ambos índices el valor del límite de la NOM inicia igual en la categoría “Mala”.

Otra diferencia importante es que el Índice AIRE Y SALUD para PM_{10} y $PM_{2.5}$ usa como indicador el promedio móvil ponderado de 12 horas, el cual proporciona un mayor peso a los datos de las últimas tres horas. Este método (NowCast) fue desarrollado por la U.S. EPA, para relacionar indicadores de corto plazo (menores a 24 horas) a su índice de calidad del aire, y así, reportar en tiempo casi real.

Las ventajas del método son:

- Responde a los cambios rápidos en la calidad del aire y cuando la calidad del aire es estable, puede acercarse los promedios de 24 horas.
- Funciona en cualquier situación de calidad del aire.
- Permite alertar oportunamente a las personas para reducir su exposición.
- En Estados Unidos, se utiliza para alertar a la población ante episodios de incendios forestales.

Por otro lado, el índice de calidad del aire de la CDMX usa la métrica del promedio móvil de 24 horas, cuyo principal inconveniente es que la detección de niveles altos se realiza horas después de que se registró el máximo horario, esto dificulta la prevención de exposición. En la **Tabla 3.2** se resumen las diferencias entre ambos índices de calidad del aire.

Figura 3.24. Comparación de las categorías del Índice de Calidad del Aire y el Índice AIRE y SALUD.

Tabla 3.2. Diferencias entre el Índice AIRE y SALUD y el Índice de Calidad del Aire de la CDMX.

Índice AIRE y SALUD	Índice de calidad del aire de la CDMX
Categorías para asignar cada intervalo de concentración	Algoritmo flexible de cálculo que asigna las concentraciones con un valor del índice (escala de 0 a 500 puntos)
Uso de promedio ponderado de 12 horas para PM_{10} y $PM_{2.5}$	Uso del promedio móvil de 24 horas relacionado con el indicador de NOM para PM_{10} y $PM_{2.5}$
Aplicación a nivel nacional	Aplicación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).
Valores más estrictos para algunos contaminantes (O_3, SO_2) y categorías relacionadas con las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) así como con los valores límites de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	Valores relacionados con el indicador de corto plazo y largo plazo de las NOM, con puntos de quiebre basados en lo establecido por la US-EPA en el CFR 40, parte 51.151.
Uso de cinco colores para designar las categorías	Uso de seis colores para designar las categorías, unificados con los que utiliza la U.S. EPA
Es el primer índice a nivel nacional	Este índice y sus actualizaciones, se reporta desde hace más de 30 años en la ZMCM
Por el momento no está vinculado a la implementación de programas de prevención de riesgos y control de emisiones en eventos de alta concentración.	Los valores se usan de referencia para la instrumentación del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) en la ZMCM.

En la **Tabla 3.3**, se muestra la comparación del número de días por categoría del Índice AIRE y SALUD y el Índice de calidad del aire y se observan las diferencias, para CO y NO_2 prácticamente son iguales, a pesar de que los intervalos de índice Aire y Salud para NO_2 son muy pequeños en la categoría “Mala” y “Muy mala”, como se muestra en la **Figura 3.25**. Para el caso de O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$ y SO_2, la variación importante es el intervalo donde comienza la categoría “Muy mala” que en casi todos los contaminantes es menor en el índice AIRE y SALUD, también se encuentra una variación en el intervalo “Regular o Aceptable”, esto es lo que provoca la diferencia en los conteos, pero esto no significa que se haya incrementado la contaminación sino la asignación de los intervalos de las categorías es lo que hace la diferencia.

Tabla 3.3. Conteos del número de días en los que se rebasa el valor de cada uno de los intervalos de las categorías para cada índice.

Categoría	CO		NO_2		O_3 (1 h)		PM_{10}		$PM_{2.5}$		SO_2	
	ICA	IAyS	ICA	IAyS	ICA	IAyS	ICA	IAyS	ICA	IAyS	ICA	IAyS
Buena	366	366	362	363	51	23	71	173	5	180	344	216
Regular/Aceptable	0	0	4	3	101	135	189	125	333	176	22	150
Mala	0	0	0	0	213	197	106	67	28	10	0	0
Muy Mala	0	0	0	0	1	11	0	1	0	0	0	0
Ext Mala	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peligrosa	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-

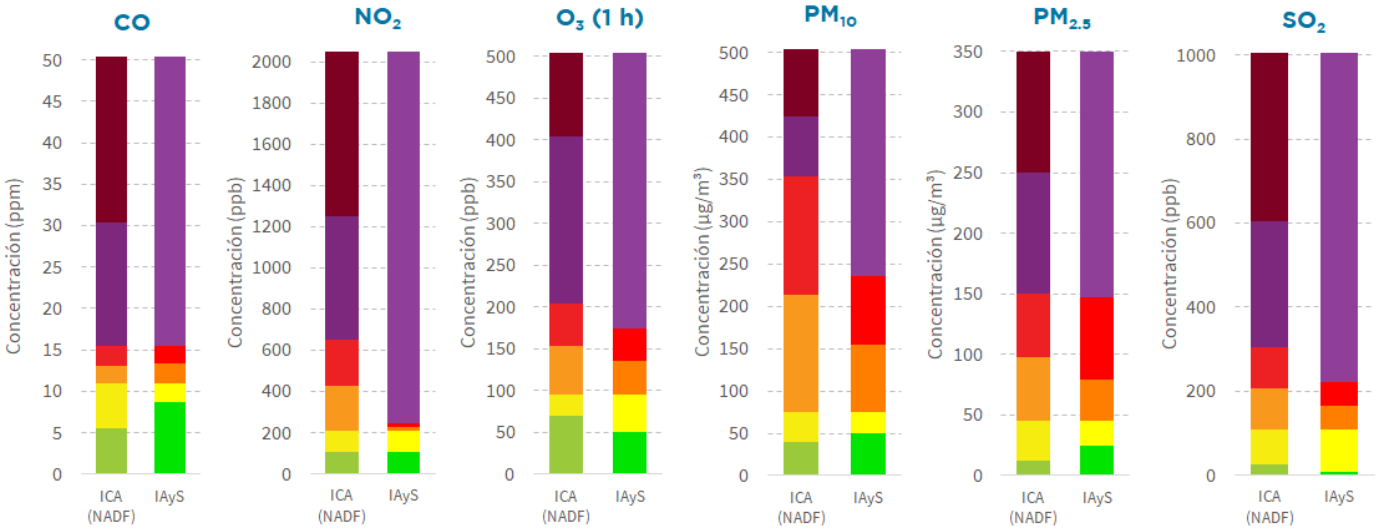


Figura 3.25. Comparación de los intervalos de concentración de cada categoría por contaminante del Índice de Calidad del Aire y el Índice AIRE y SALUD.

Difusión del Índice AIRE Y SALUD

La población que sigue la información del SIMAT estaba a costumbrada a un valor numérico adimensional, el cual asociaba la calidad del aire con el aumento o reducción del valor en una escala de 0 a 500 puntos del índice. Con el objetivo de que el cambio al nuevo Índice AIRE y SALUD, no causara confusión, en la página del SIMAT se reportan los dos índices de manera comparativa.

En la **Tabla 3.4** se presentan las categorías del **Índice AIRE y SALUD**, así como los intervalos de concentración de cada contaminante y el indicador que utiliza. En la **Tabla 3.5** se presenta la descripción de las categorías, el nivel de riesgo asociado y recomendaciones para diferentes grupos de población.

Es importante mencionar que para el reporte del **Índice AIRE y SALUD**, se consideran todas las estaciones de monitoreo excepto las de transporte (ACO, AJU, INN, MPA y MON).

En el caso del ozono, el índice se calcula con dos métricas, el máximo horario y el máximo del promedio de 8 horas, pero se reporta el más alto en la categoría de riesgos, mientras que en partículas se usa el máximo del promedio ponderado de 12 horas.

Tabla 3.4. Categorías, intervalos de concentración y métricas para todos los contaminantes del Índice AIRE y SALUD.

Categoría	PM_{10} ($\mu g/m^3$) NowCast	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) NowCast	O_3 (ppm) 1h	O_3 (ppm) 1h	NO_2 (ppm) 1h	SO_2 (ppm) m24h	CO (ppm) m8h
Buena	0 – 50	0 – 25	0 – 0.051	0 – 0.051	0 – 0.107	0 – 0.008	0 – 8.75
Aceptable	51 – 75	26 – 45	0.052 – 0.095	0.052 – 0.070	0.108 – 0.210	0.009 – 0.110	8.76 – 11.00
Mala	76 – 155	46 – 79	0.096 – 0.135	0.071 – 0.092	0.211 – 0.230	0.111 – 0.165	11.01 – 13.30
Muy Mala	156 – 235	80 – 147	0.136 – 0.175	0.093 – 0.114	0.231 – 0.250	0.166 – 0.220	13.31 – 15.50
Ext. Mala	> 235	> 147	> 0.175	> 0.114	> 0.250	> 0.220	>15.50

NowCast: promedio móvil ponderado de 12 horas
m8h: promedio móvil de 8 horas
m24h: promedio móvil de 24 horas

Tabla 3.5. Categorías del Índice AIRE y SALUD

Índice AIRE y SALUD	Nivel de riesgo asociado	RECOMENDACIONES	
		Grupos sensibles	Toda la población
Buena	**Bajo** Se considera que el riesgo es mínimo.	Disfruta las actividades al aire libre.	
Aceptable	**Moderado** Las personas sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios (asmáticos). Posible agravamiento de enfermedad pulmonar y cardiaca en adultos mayores, así como personas con enfermedad cardiopulmonar prexistente.	Considera reducir actividades físicas vigorosas al aire libre.	Disfruta actividades al aire libre.
Mala	**Alto** Probabilidad de disminución en la capacidad pulmonar en personas sanas. Incremento en la probabilidad de aparición de síntomas respiratorios en personas sensibles (niños, ancianos, personas con deficiencias nutricionales, individuos que realizan actividades en exteriores, ciclistas, trabajadores). En personas con enfermedades y cardiacas hay probabilidad de agravamiento y disminución en la tolerancia de la actividad física, así como mayor probabilidad de muertes prematuras.	Evita actividades físicas (tanto moderadas como vigorosas) al aire libre.	Reduce actividades físicas vigorosas al aire libre.
Muy Mala	**Muy Alto** Mayor probabilidad de presentar síntomas respiratorios en población general. Agravamiento de síntomas respiratorios en poblaciones sensibles (niños, adultos mayores, personas que trabajan en exteriores, ciclistas) y en personas con enfermedad pulmonar preexistente. Incremento en síntomas cardiovasculares en personas con padecimientos cardiacos, así como mayor probabilidad de muerte prematura en personas con enfermedad cardiaca o pulmonar.	No realizar actividades al aire libre. Acude al médico si presentas síntomas respiratorios o cardiacos.	Evita actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre.
Extremadamente Mala	**Extremadamente Alto** Incremento en la probabilidad de síntomas respiratorios severos en población general. En personas sensibles (niños, adultos mayores, individuos con deficiencias nutricionales), se presentan serios efectos respiratorios y agravamiento de síntomas. En personas con enfermedades cardiacas o respiratorias preexistentes, hay agravamiento de síntomas e incremento en la probabilidad de muerte prematura.	Permanece en espacios interiores. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardiacos.	

En esta sección se hizo la evaluación del **Índice AIRE y SALUD** para el año 2020. En la concentración horaria de ozono, se registraron 208 días con una calidad del aire MALA (> 95 ppb), de los cuales 11 alcanzaron la categoría MUY MALA (>135 ppb), esto fue una reducción importante comparada con 2019, que utilizando el mismo Índice AIRE y SALUD, obtuvo 30 días en categoría MUY MALA casi el triple de lo registrado en 2020. En términos del número de horas, el ozono tuvo un total de 706 horas (~8% del total de horas al año) con una categoría del Índice superior a 95 ppb (límite NOM).

En la **Figura 3.26** se presenta la distribución de las horas del año por categoría y por estación de monitoreo, es importante mencionar que sólo se presentan las que obtuvieron, al menos, el 75% de información en el 2020.

En los sitios ubicados en el Estado de México presentan un porcentaje mayor de horas con buena calidad del aire a comparación de las estaciones en la CDMX, por el contrario, se registró un mayor número de horas con MALA calidad del aire en las estaciones de la CDMX.

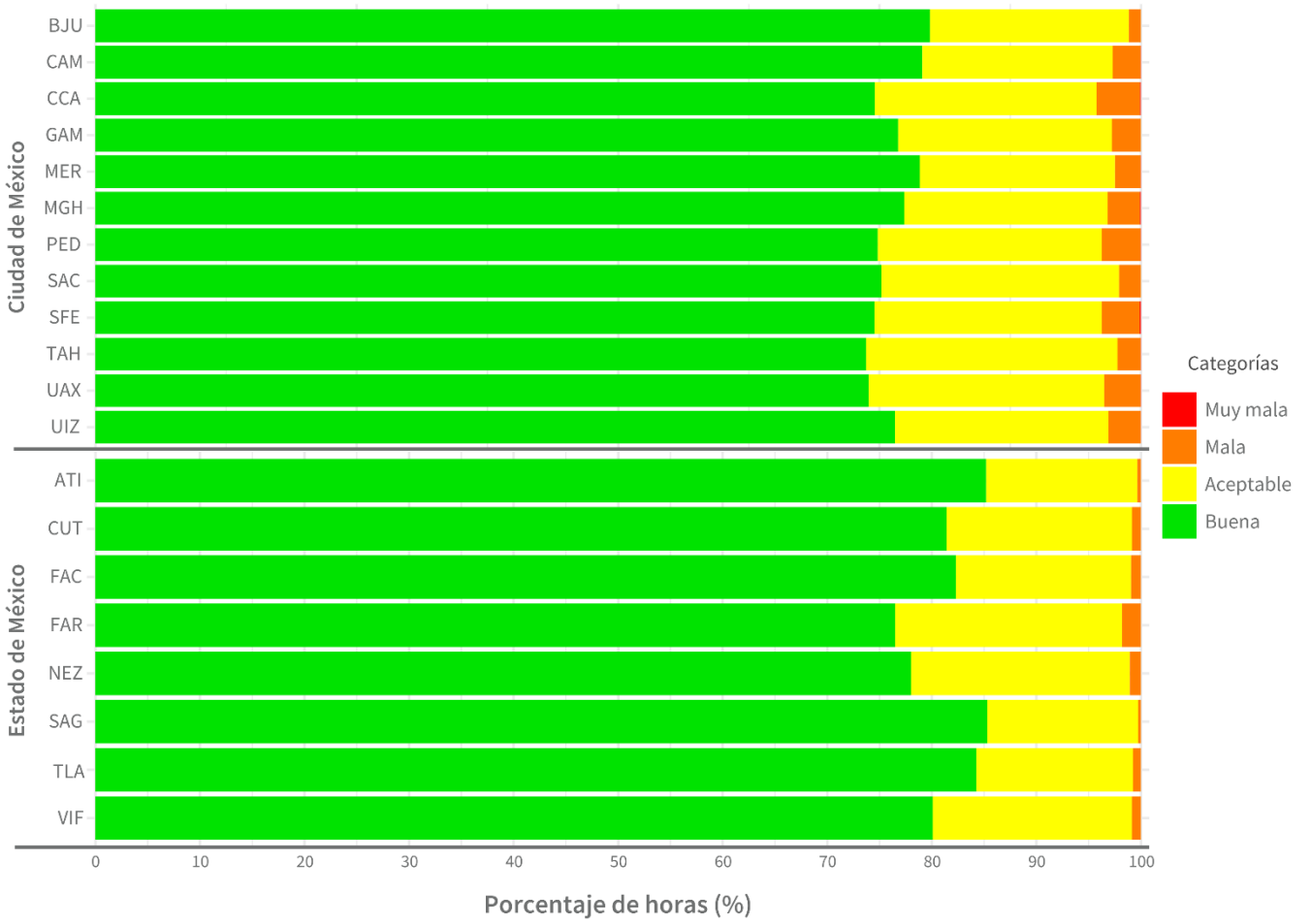


Figura 3.26. Porcentaje de horas de ozono (1 h) en cada categoría del Índice AIRE y SALUD por estación.

En el análisis general del Índice AIRE y SALUD en 2020 con todos los contaminantes (**Figura 3.27**), es importante mencionar que para el conteo de días en partículas se usa el promedio de 24 horas como indica la NOM-025-SSA1-2014, ya que el promedio ponderado (NowCast) solamente es un pronóstico para el reporte horario. En el comportamiento general del Índice AIRE y SALUD, se registraron 125 días limpios, para todos los contaminantes esto es, que esos días la calidad del aire estuvo dentro de las categorías BUENA y ACEPTABLE; por otro lado 229 días la calidad del aire superó la categoría MALA en al menos un contaminante y por último los 12 días restantes, la calidad del aire fue MUY MALA. El comportamiento mensual del Índice muestra que enero tuvo mejor calidad del aire, con solo 9 días en la categoría MALA y dos en MUY MALA.

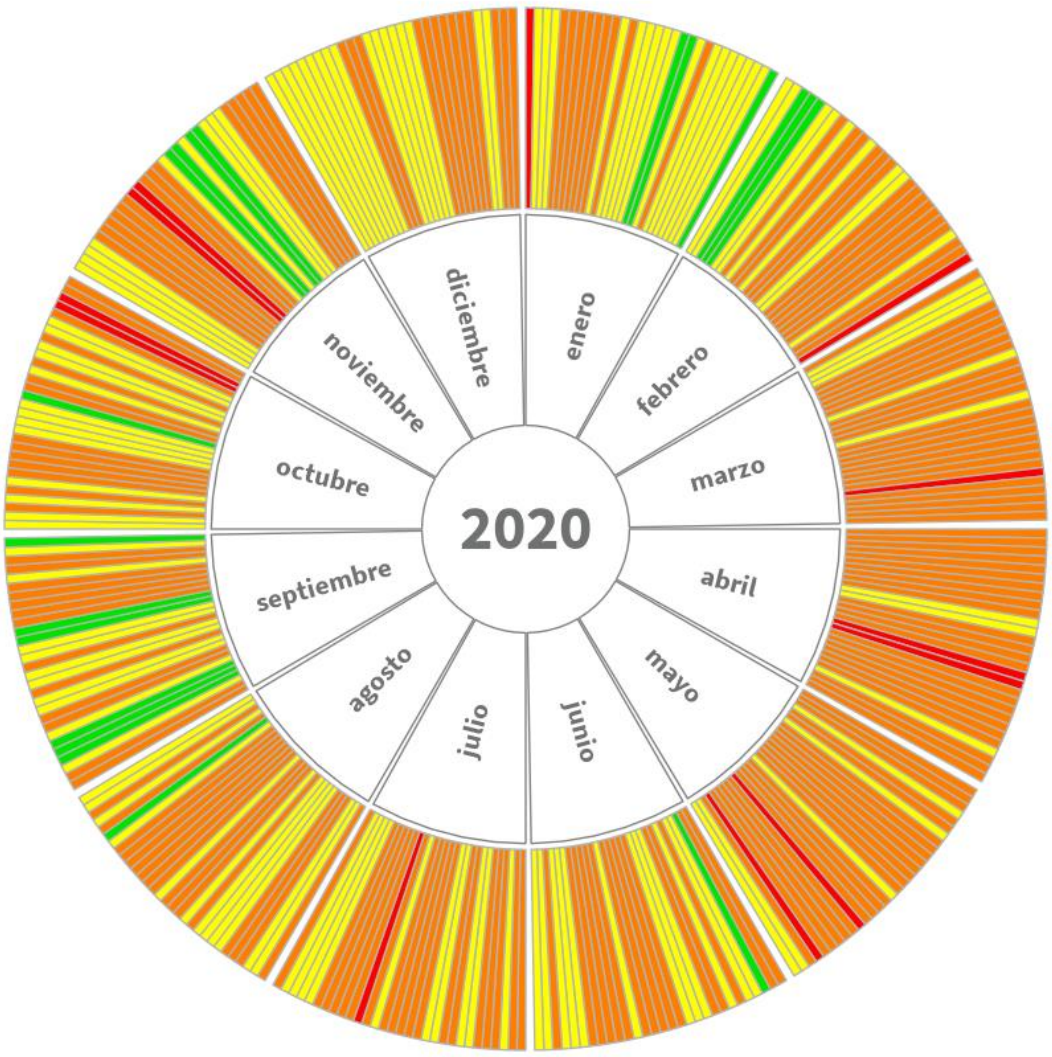


Figura 3.27. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD para 2020 considerando todos los contaminantes.

En lo individual, el ozono presentó mayor número de días con MALA o MUY MALA calidad del aire con un total de 208, mientras que en PM_{10} fueron 68 y para $PM_{2.5}$ se registraron 10 días.

El índice de ozono de una hora se mantuvo en MALA calidad del aire en la mayoría del año, con abril y mayo como los meses más complicados, por el contrario, enero sólo tuvo 6 días con MALA calidad del aire (**Figura 3.28a**). En la comparación con el 2019 (**Tabla 3.6**), en la CDMX se observó un incremento de días en categoría MALA o MUY MALA en un 6 % (equivalente a 12 días), por el contrario, para los sitios en el Estado de México hubo una reducción del 28 %. El aumento de días con MALA calidad del aire en la CDMX fue ocasionado por el régimen sensible a COV que se presenta en la atmósfera en la ZMCM y las restricciones de movilidad, efecto explicado en la sección de ozono en este capítulo.

El índice de PM_{10}, se mantuvo en BUENA y REGULAR durante la mayor parte del año; el mes más limpio fue agosto, con todos sus días en BUENA calidad del aire, por el contrario, diciembre no registró días con calidad del aire BUENA y tuvo un día en la categoría MUY MALA debido al uso de pirotecnia durante el primero de enero (**Figura 3.28b**). En comparación con 2019, los sitios en ambas entidades, CDMX y Estado de México presentaron una reducción del 76 % y 64 %, respectivamente, en el número de días con MALA o MUY MALA calidad del aire (**Tabla 3.6**).

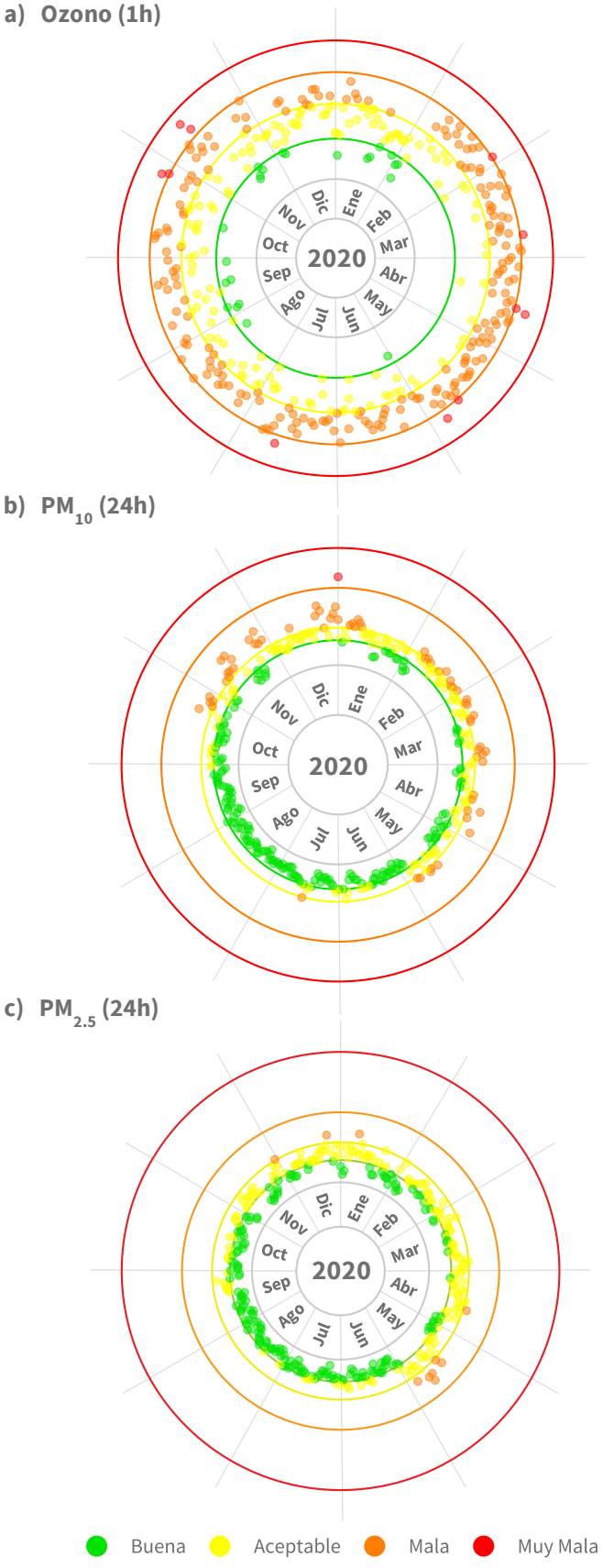


Figura 3.28. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD para: **a)** O_3, **b)** PM_{10} y **c)** $PM_{2.5}$.

El índice de $PM_{2.5}$ estuvo en calidad del aire BUENA y REGULAR en la mayoría del año; sin embargo, mayo fue el mes con el máximo número de días con calidad del aire MALA con un total de 6, mientras que enero, abril, noviembre y diciembre sólo presentaron un día en esta categoría (**Figura 3.28c**). En comparación con el 2019 (**Tabla 3.5**), las estaciones en ambas entidades, CDMX y Estado de México, registraron una disminución del 79 % y 87 %, respectivamente, en el número de días dentro de la categoría MALA o MUY MALA calidad del aire. Esto se debe a las restricciones de actividades de la pandemia y a que, durante mayo del 2019, hubo incendios masivos que afectaron la calidad del aire.

Tabla 3.6. Comparación del número de días con categoría MALA o superior del 2019 al 2020 por contaminante y entidad

Contaminante	Entidad	Número de días con calidad del aire MALA		Diferencia de días (2020-2019)	Porcentaje de cambio (%)
		2019	2020		
Ozono (O_3)	CDMX	188	200	12	6 ↑
	Edo. de Méx.	137	99	-38	-28 ↓
PM_{10}	CDMX	78	19	-59	-76 ↓
	Edo. de Méx.	173	62	-111	-64 ↓
$PM_{2.5}$	CDMX	42	9	-33	-79 ↓
	Edo. de Méx.	47	6	-41	-87 ↓

ÍNDICE DE RIESGO PARA PERSONAS SUSCEPTIBLES (IRPS)

En 2017, en colaboración con el Instituto Marron de la Universidad de Nueva York (NYU), se construyó el **Índice de Riesgo para Personas Susceptibles** (**IRPS**) con el objetivo de mejorar la comunicación de riesgos a la salud derivados de la contaminación del aire. El **IRPS** está dirigido principalmente a niños, adultos mayores, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, las cuales pueden presentar síntomas incluso en concentraciones bajas de contaminación. El IRPS es un **índice multicontaminante** ya que contempla los riesgos en salud por la exposición a O_3, $PM_{2.5}$ y NO_2, lo que es representativo de la mezcla compleja de aire en la CDMX. El desarrollo de este índice se puede consultar en el capítulo 8 del Informe Anual de Calidad del Aire 2019 (SEDEMA, 2022) o en el reporte técnico realizado por la SEDEMA y el Instituto Marron de NYU (SEDEMA, 2018)

El comportamiento del IRPS en 2020, muestra los días de niveles altos de O_3 y la combinación con $PM_{2.5}$, ya que el NO_2, casi todo el año, tuvo calidad del aire buena en el Índice AIRE y SALUD (**Figura 3.29**). El riesgo Bajo del IRPS (1 a 3 de la escala) obtuvo su mayor conteo de días en septiembre con 13, seguido de agosto con 10. En el riesgo Alto (IRPS de 7 a 9), mayo tuvo el máximo de días con 8 y el IRPS más alto del año fue de 9, registrado el 21 de mayo.

La única contingencia de 2020 se presentó el 11 de noviembre, que resalta con el color morado en el mosaico de O_3 en el máximo del móvil de 8 horas y este día, el IRPS fue 7. El índice durante la contingencia fue menor que el registrado el 21 de mayo (IRPS = 9), ya que este día, las $PM_{2.5}$ registraron una concentración de 63 $\mu g/m^3$ (promedio 24 h), lo que es 18 $\mu g/m^3$ arriba del límite de la NOM (45 $\mu g/m^3$) y el O_3 de 8 horas registró un máximo de 108 ppb, esta combinación causó un IRPS mayor al registrado el día de la contingencia del 11 de noviembre, donde el máximo de $PM_{2.5}$ fue 32 $\mu g/m^3$, el cual es menor al límite de la NOM y en el O_3, se alcanzó un máximo horario de 159 ppb que disminuyó en el transcurso del día y el valor de contingencia ($O_3 \geq 155$ ppb) solamente se superó durante una hora.

En general, el IRPS responde correctamente a la concentración alta durante la temporada de ozono, en los meses cálidos y secos (marzo a junio), así como durante la temporada de partículas, en invierno (noviembre a febrero). El IRPS también responde cuando la concentración es baja, ya que se obtienen valores menores del índice durante la época de lluvia, que es la más limpia.

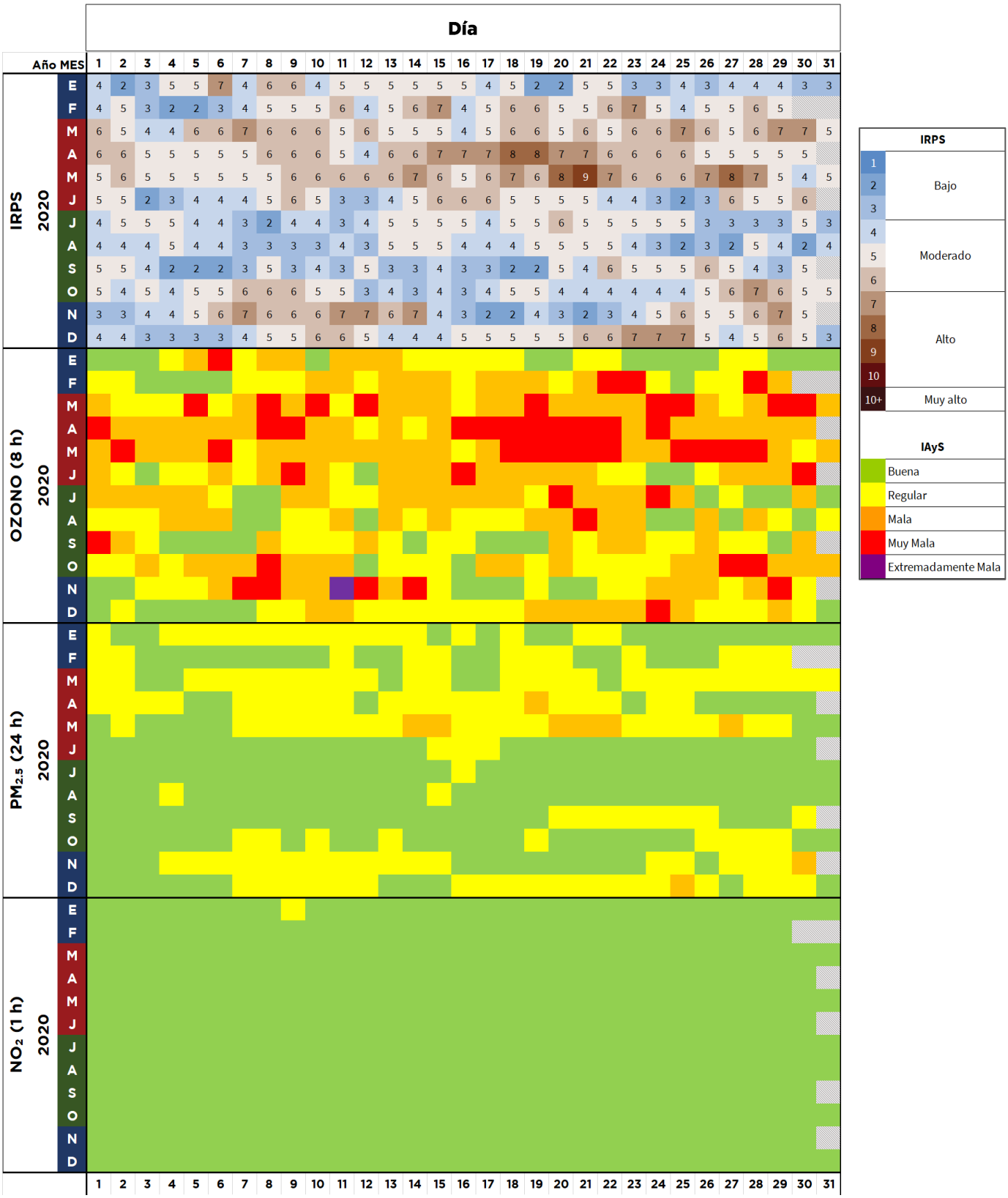
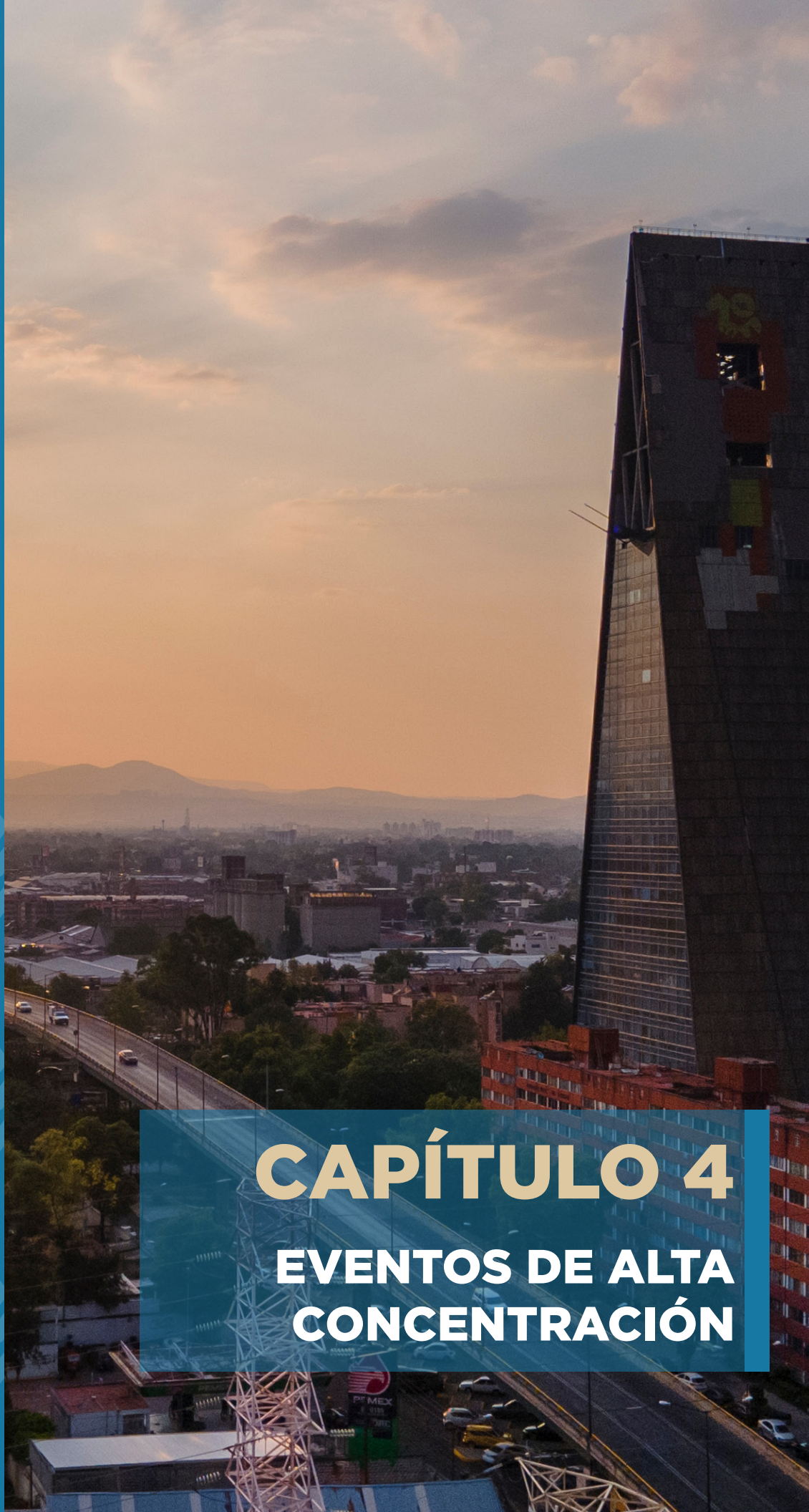


Figura 3.29. Comportamiento del IRPS en 2020 y comparación con el índice AIRE y SALUD de O_3 (8 h), $PM_{2.5}$ (24 h) y NO_2 (1 h)

INFORME ANUAL
2020



CAPÍTULO 4

EVENTOS DE ALTA CONCENTRACIÓN

Durante 2020, la concentración de los contaminantes y sus precursores disminuyó considerablemente debido a las restricciones por la pandemia de COVID-19. Esto también tuvo un efecto importante en el número de eventos de contingencia, ya que solo se presentó **un evento**, el cual fue por ozono y ocurrió fuera de la época seca caliente o temporada de ozono.

La temporada de ozono en la ZMVM es del 15 de febrero al 15 de junio y tiene características como la presencia de sistemas de alta presión, estabilidad atmosférica, vientos débiles, alta radiación solar y temperatura elevada (SEDEMA, 2022), estos factores son determinantes para el aumento en la concentración de ozono y el incremento en el número de contingencias (O_3> 154 ppb).

Los patrones meteorológicos que se presentaron durante la temporada de ozono 2020 fueron muy similares a los años pasados, incluso se registran anomalías positivas importantes de temperatura, uno de los factores que favorecen las reacciones fotoquímicas de formación de ozono.

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los meses de marzo a mayo del 2020, se clasificaron con altas anomalías positivas y establecieron su registro histórico más cálido (SMN, 2020). En este periodo también se presentaron sistemas de alta presión persistentes en los tres meses.

En marzo se observó una disminución en los sistemas frontales y la presencia constante de un sistema de alta presión desde la segunda quincena del mes, lo que provocó temperaturas máximas mayores a 35 °C observadas principalmente en el occidente, centro y sur del país. En consecuencia, la Ciudad de México, Michoacán, Colima y Quintana Roo presentaron su tercer marzo más cálido registrado históricamente. En abril también se observó un sistema de alta presión persistente, lo que afectó a las regiones del occidente, centro, sur y sureste del país con temperaturas máximas mayores a 35 °C. Finalmente, en mayo se observó en el noreste, noroeste, occidente y centro del país, la presencia de un sistema de alta presión que ocasionó temperaturas máximas mayores a 40 °C.

Es importante mencionar que, incluso con estas condiciones meteorológicas observadas durante la temporada de ozono 2020, no se presentó ningún evento de contingencia que suele ocurrir en dicho periodo. Esto debido a una considerable reducción en la emisión de contaminantes primarios provocada por las restricciones de la pandemia, y, en consecuencia, esto tuvo un efecto importante en el nivel de ozono, que es un contaminante secundario, formado por reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Los efectos de la pandemia en la calidad del aire se describen en el capítulo 6 de este informe.

En la **Figura 4.1**, se presenta el conteo de horas con O_3 mayor a 95 y 154 ppb **durante las temporadas de ozono** desde 1990 a 2020. Se observa que en 2020 hay un comportamiento similar a los años anteriores en cuanto al número de horas con concentración mayor a 95 ppb; sin embargo, es importante resaltar que 2020 fue el único año que no registró horas con O_3 mayor a 154 ppb, es decir, no se activó ningún episodio de contingencia en esta **temporada de ozono**.

Como se mencionó anteriormente, la única contingencia del año 2020 ocurrió fuera de la temporada de ozono, durante noviembre. Este mes también se caracterizó por anomalías positivas de temperatura y se categorizó como uno de los noviembres más cálidos en el periodo 1981 – 2010 (SMN, 2020). En la siguiente sección se describe el evento de contingencia ocurrido en 2020.

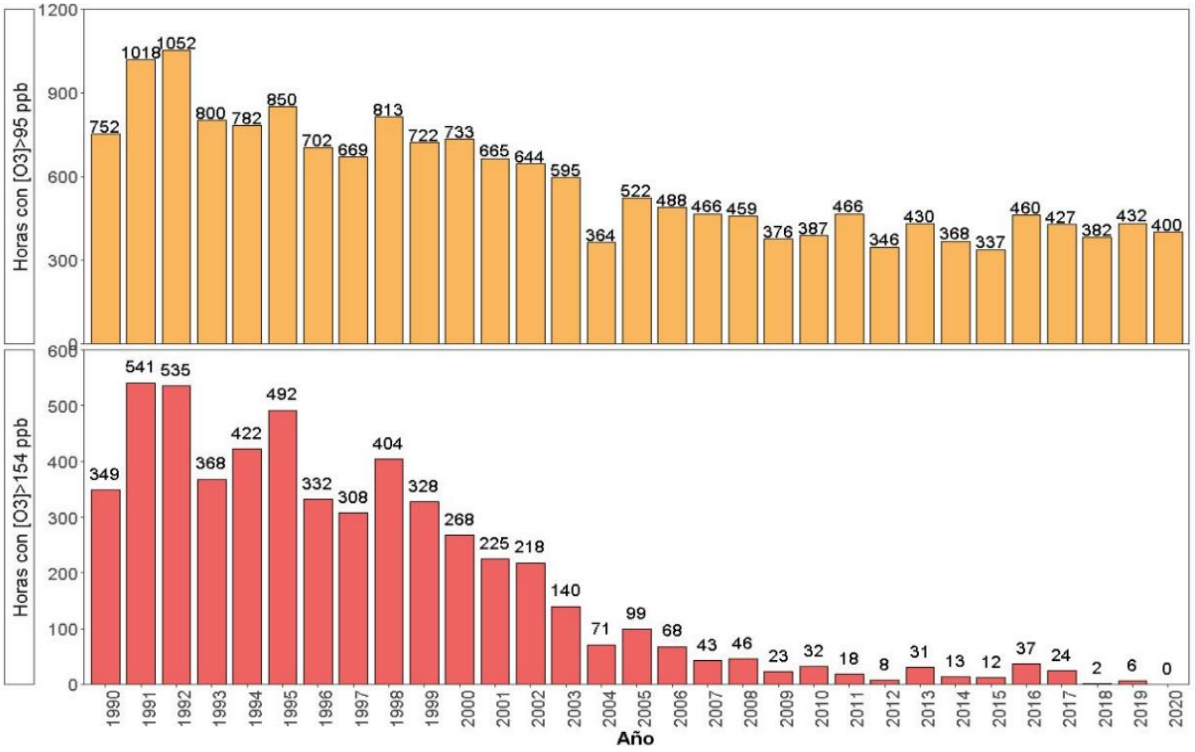


Figura 4.1. Comparación del número de horas con concentración de ozono mayor a 95 y 154 ppb durante la temporada de ozono (15/feb – 15/jun) de 1990 a 2020.

ACTIVACIÓN DE FASE I O_3 : 11 DE NOVIEMBRE

Durante el 11 de noviembre se presentó el único evento de contingencia del 2020. En la **Figura 4.2** se presenta el comportamiento de la concentración de ozono durante este día, en la que se observa que el O_3 empezó a incrementar desde el mediodía y a las 13:00 h se superó el valor horario de la NOM en las estaciones Santa Fe (SFE) con 100 ppb y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con 99 ppb, y, de acuerdo con las categorías del **nuevo Índice AIRE y SALUD** (ver capítulo 3), la calidad del aire fue MALA. En la siguiente hora, ocho estaciones se encontraban en MALA calidad del aire, con el máximo en CCA con 125 ppb. A las 15:00 h, once estaciones superaron la NOM, con los valores máximos en CCA y Pedregal (PED), ambas con 142 ppb, seguidas de SFE con 137 ppb, estos valores ya corresponden a la categoría de calidad del aire **MUY MALA** del Índice AIRE y SALUD, la cual ya comienza en 136 ppb.

El máximo del día se alcanzó a las 16:00 h en CCA con 159 ppb, seguida de PED con 153 ppb, Miguel Hidalgo (MGH) con 145 ppb y SFE con 143 ppb. En total, 16 estaciones superaron la NOM y en este momento, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) declaró la Fase I de contingencia, debido a la presencia de condiciones meteorológicas adversas persistentes las cuales favorecieron la formación e incremento de ozono, como alta radiación solar y baja velocidad de viento, esto contribuyó al estancamiento del contaminante en la zona suroeste de la ciudad. A las 17:00 h, continuaron los valores altos (> 150 ppb) en 13 estaciones de monitoreo, con los máximos en CCA, SFE y PED con 154, 151 y 150 ppb, respectivamente. Durante las siguientes horas, empezó el descenso de la concentración, y a las 18:00 h solo 4 estaciones tuvieron máximos superiores al límite de la NOM (95 ppb), con el valor más alto en SFE con 131 ppb. Después de esta hora, ningún sitio de monitoreo superó la norma, ya que a las 19:00 h, el máximo fue 71 ppb; sin embargo, se mantuvo la Fase I de contingencia debido a que se pronosticaban condiciones meteorológicas adversas para el siguiente día.

Durante el 12 de noviembre, la concentración de ozono superó 95 ppb desde las 14:00 h en seis estaciones y el máximo fue en FES Aragón (FAR) con 108 ppb. El número de sitios, así como la concentración de ozono aumentaron en las siguientes horas, y a las 16:00 h se alcanzó la concentración máxima del día con 145 ppb en SFE, seguida de Tláhuac (TAH) con 143 ppb y CCA con 141 ppb, las tres estaciones en calidad del aire MUY MALA de acuerdo al Índice AIRE y SALUD. En la siguiente hora (17:00 h), 15 sitios superaron 95 ppb y el máximo fue de 145 ppb en SFE. A las 19:00 h, solamente CCA excedía la NOM y finalmente, a las 20:00 h, ninguna estación superó el umbral normado y en este momento, la CAMe suspendió la contingencia ambiental Fase I, debido a que se pronosticaban

condiciones favorables para el siguiente día, con el debilitamiento del sistema de alta presión que ocasionó estabilidad atmosférica en el centro del país y, en consecuencia, la intensidad del viento fue mayor, esto favoreció una mejor dispersión de contaminantes.

En el análisis de los vientos en horas previas al máximo de O_3 (10:00 a 16:00 h), se observó que hubo vientos débiles provenientes del noreste y norte (**Figura 4.3**), la baja intensidad de los vientos ocasionó zonas de convergencia en el centro-suroeste, y debido a la barrera natural de montañas al sur, el ozono se acumuló e incrementó en la región.

En la meteorología a escala regional, durante el 11 y 12 de noviembre, un sistema de circulación anticiclónica afectó las regiones centro del país, en niveles altos y bajos de la troposfera. En consecuencia, el campo de viento fue débil, con cielos despejados.

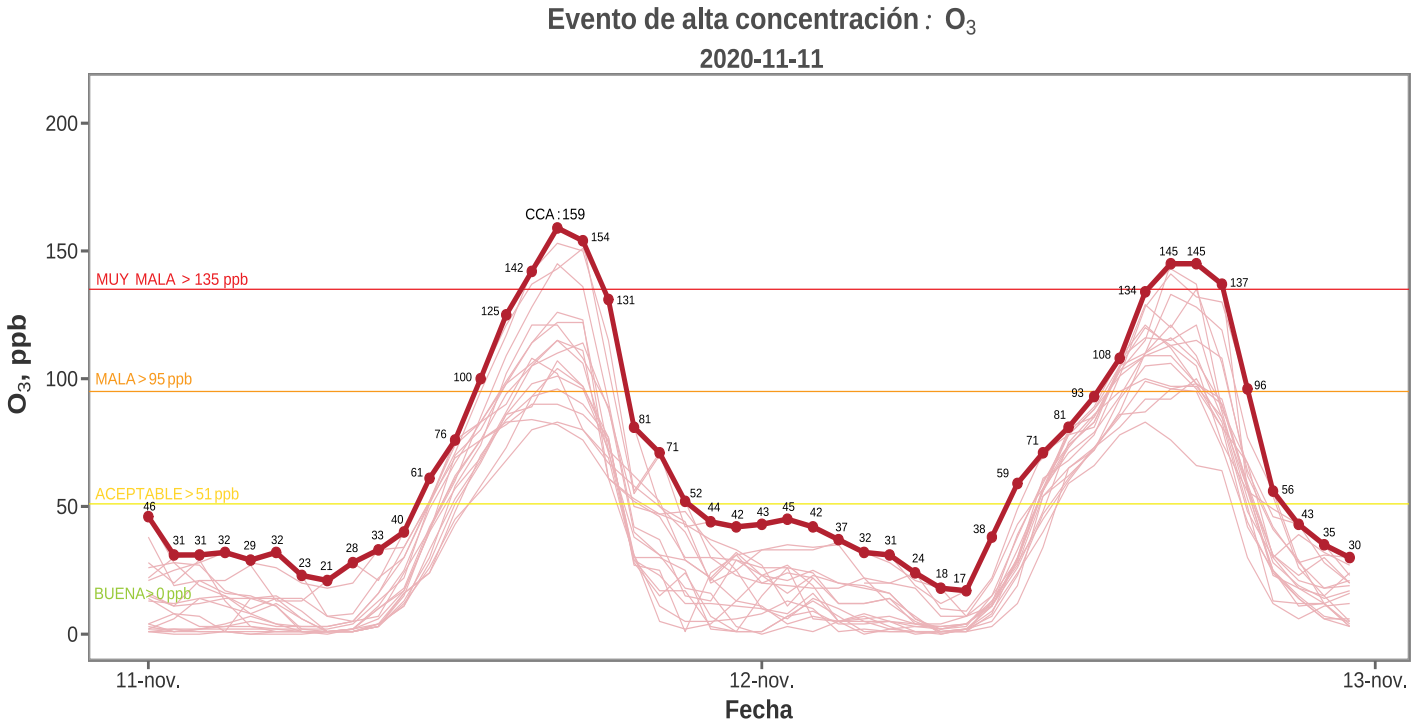


Figura 4.2. Concentración de O_3 del 11 al 12 de noviembre. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación, la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son las categorías del Índice AIRE y SALUD.

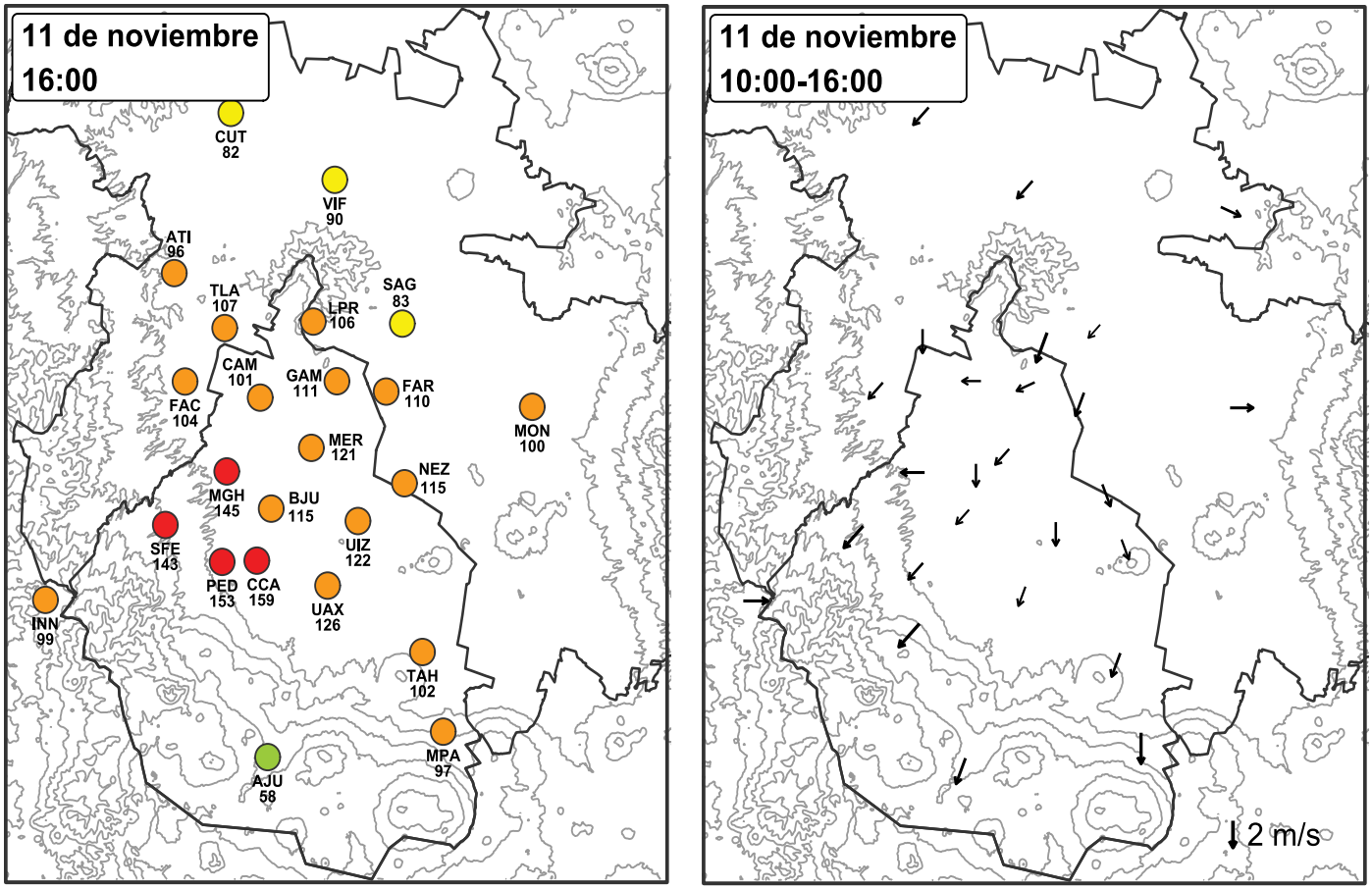


Figura 4.3. Índice AIRE y SALUD para O_3 y campos de viento durante el 11 de noviembre. El mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice AIRE y SALUD (color) y la concentración horaria en ppb a las 16:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 10:00 y 16:00 h.

INFORME ANUAL
2020

CAPÍTULO 5

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

La lluvia ácida y los efectos que produce en los ecosistemas es un tema de investigación que, a nivel mundial, tuvo su auge en las décadas de los setentas y ochentas, primero en Europa y posteriormente, en América. Esta problemática fue considerada como una de las mayores amenazas ambientales de la época (Grennfelt et al., 2020).

Actualmente, existe un legado derivado de las investigaciones sobre el depósito atmosférico (Rosseland, 2021), cuyos resultados contribuyeron al entendimiento de la problemática y su mitigación, las principales acciones derivadas de la investigación sobre la lluvia ácida fueron:

- Creación de metodologías para el estudio y cuantificación de los iones presentes en el agua de lluvia.
- Implementación de políticas públicas para la mitigación de los agentes causantes de la acidificación en lluvia y cuerpos de agua.
- Fomentar el monitoreo continuo de contaminantes, depósito atmosférico y de los ecosistemas, con la finalidad de recopilar información para observar y analizar la tendencia en un periodo determinado.

En México, se ha estudiado la relación del depósito atmosférico con la calidad del aire, la dinámica de dispersión de contaminantes y el cambio climático.

El Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM ha contribuido para resaltar la importancia de este tema, ya que se tiene documentado que, desde una reunión de la Unión Geofísica Mexicana en 1981, ya se consideraba el análisis de la lluvia ácida en el Valle de México. Posteriormente, en 1988, la Asociación del Control de la Contaminación del Aire (APCA por sus siglas en inglés) publicó el primer estudio sobre depósito atmosférico húmedo en México, donde se encontró la presencia de lluvia ácida en muestreos realizados de 1986 a 1987 en Tijuana, Baja California (UNAM, 2017).

En 1997, el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México implementó la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) conformada por 16 estaciones, para iniciar campañas de medición de lluvia ácida. Actualmente, la red continúa en operación y aporta información relevante sobre la lluvia ácida, sus precursores y la cuantificación de los iones.

Es importante mencionar que la REDDA es la única red de depósito atmosférico en el país, lo cual resalta la relevancia de fomentar la caracterización de la lluvia ácida a nivel nacional, para tener mayor entendimiento y cuantificación de la problemática.

CAMPAÑA 2020

La campaña 2020 se afectó por la pandemia COVID-19 ya que las restricciones de actividades limitaron la cantidad de sitios de la REDDA, en consecuencia, de las 16 estaciones que la integran, sólo 9 continuaron en operación (**Figura 5.1**) y el número de muestreos semanales recolectados y analizados disminuyó considerablemente. Se usaron los siguientes criterios para elegir qué sitios de la REDDA continuarían midiendo en 2020:

1) Cantidad de personal sin condiciones de alto riesgo y con posibilidad de trabajar durante la pandemia.

2) Ubicación. Se priorizaron los sitios en áreas de conservación y zonas urbanas relevantes para la investigación.

3) Cobertura. Fue necesario tener información de las regiones norte, sur, centro, este y oeste de la ZMCM.

4) Accesibilidad y seguridad. El ingreso en algunos sitios fue limitado por la implementación de centros COVID-19 o por estar en edificios que suspendieron actividades (oficinas de gobierno y escuelas).

En el SIMAT se utiliza el criterio de **suficiencia de información** para conocer el porcentaje de datos existentes en cada estación con respecto al número de datos esperado durante un periodo determinado. Esto es importante para poder realizar un análisis estadístico representativo (Hidalgo, 2011).

Específicamente en la REDDA, la suficiencia se calcula considerando como 100 %, el número esperado de muestreos semanales (o número esperado de eventos de lluvia) en cada estación durante el periodo de la campaña.

El total de muestreos en 2020 en la estación LAA fue de 18, debido a que dicho sitio inició actividades desde junio, mientras que el resto de las estaciones el total de muestreos fue 16, debido a que iniciaron en julio. Los sitios con el menor porcentaje de suficiencia de datos fueron Museo de la Ciudad de México (MCM), Montecillo (MON) con 56 % cada una y Ecoguardas Ajusco (EAJ) con 69 %. El resto de las estaciones presentaron suficiencia superior al 75 %.

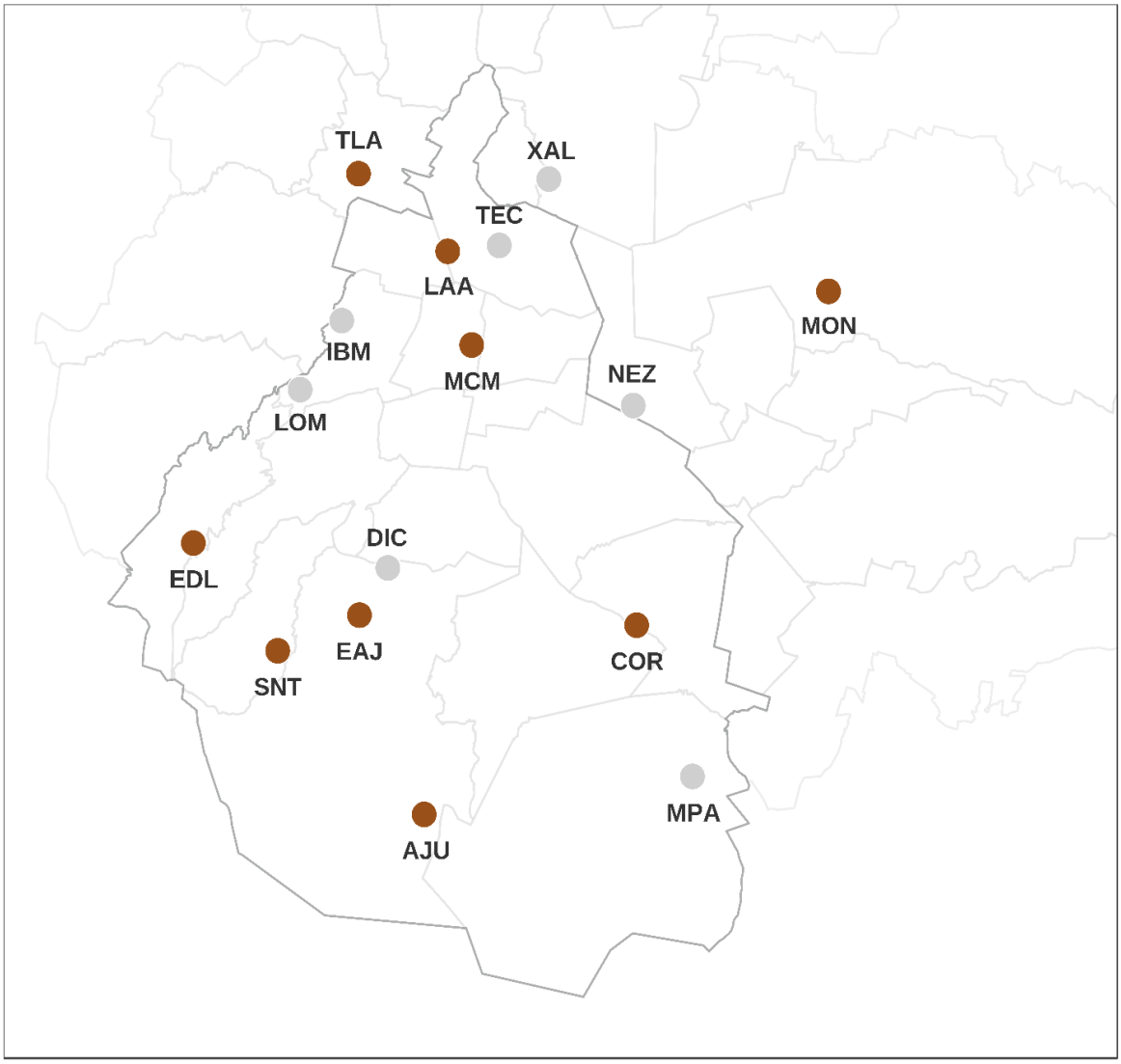


Figura 5.1. Distribución espacial de las estaciones de REDDA. Los sitios en gris son las que no operaron durante 2020 debido a la pandemia.

PRECIPITACIÓN ACUMULADA

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el 2020 tuvo un acumulado nacional de 722.5 milímetros (mm), lo cual fue 2.7 % menor respecto al promedio histórico (CONAGUA, 2021). Este déficit de precipitación a nivel nacional, tuvo efectos en los registros de la REDDA, aunado a la reducción de estaciones y muestras durante 2020.

El promedio de la precipitación acumulada durante toda la campaña fue de 488 mm. A nivel estación, los máximos se presentaron en Exconvento Desierto de los Leones (EDL) con 772 mm y Ajusco (AJU) con 721 mm, mientras que MON y CORENA (COR) registraron los mínimos con 221 mm y 306 mm, respectivamente (**Figura 5.2**).

En el análisis por mes, los máximos de precipitación fueron en agosto con 1,461 mm y septiembre con 1,287 mm, mientras que el mínimo fue en octubre con 296 mm. A nivel semanal, el máximo se registró en la tercera semana de septiembre con 704 mm y el mínimo semanal fue de 31 mm, el cual se presentó a finales de septiembre.

En la distribución espacial de la precipitación registrada durante 2020 (**Figura 5.3**) se observa que en la zona oeste y suroeste de la Ciudad de México se registró una mayor precipitación, a diferencia del norte, noreste, este y sureste. Este patrón es congruente con lo observado en años anteriores.

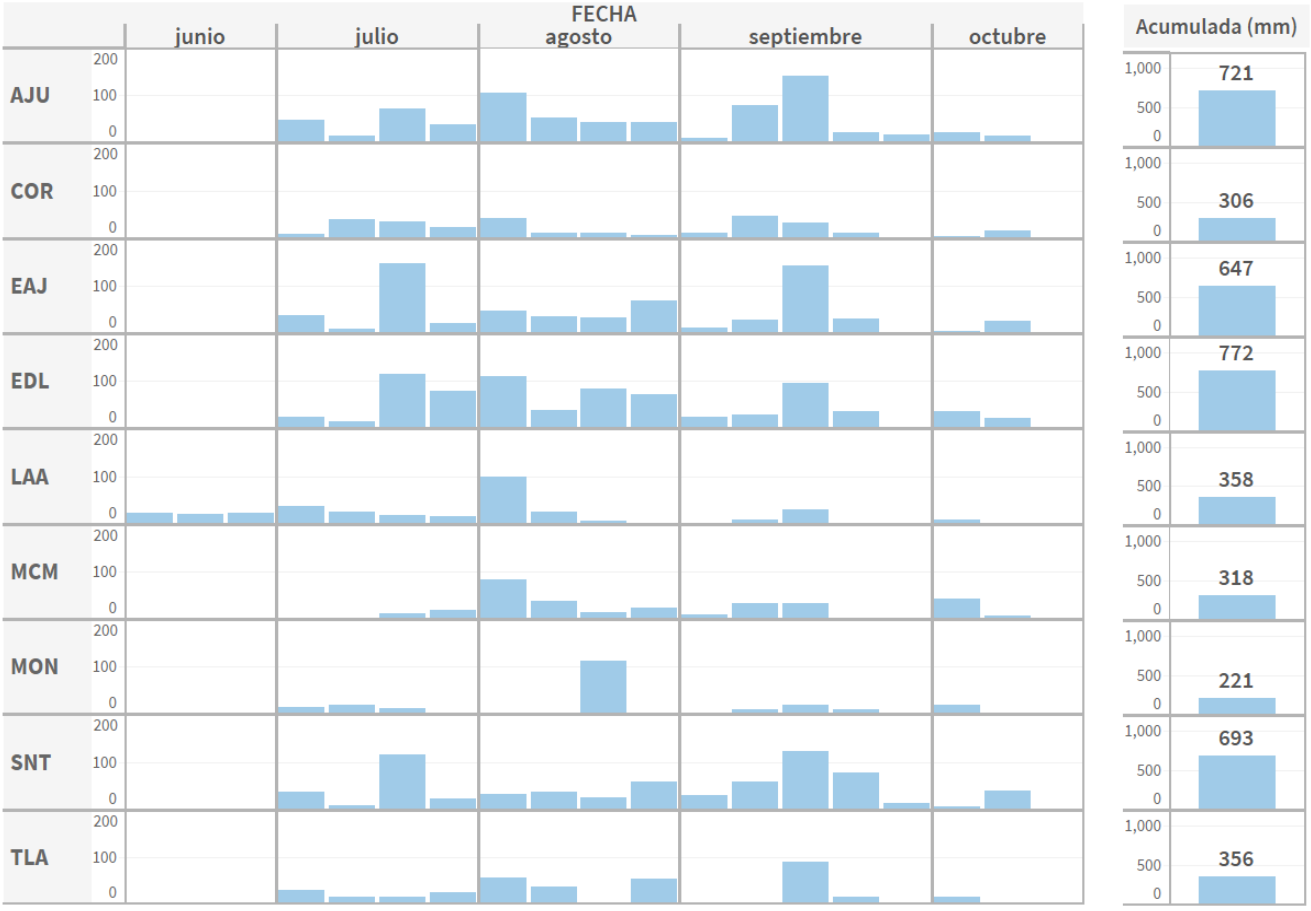


Figura 5.2. Precipitación acumulada semanal por mes (izquierda) y precipitación acumulada total del periodo junio – octubre 2023 por estación (derecha). Expresado en mm de lluvia.

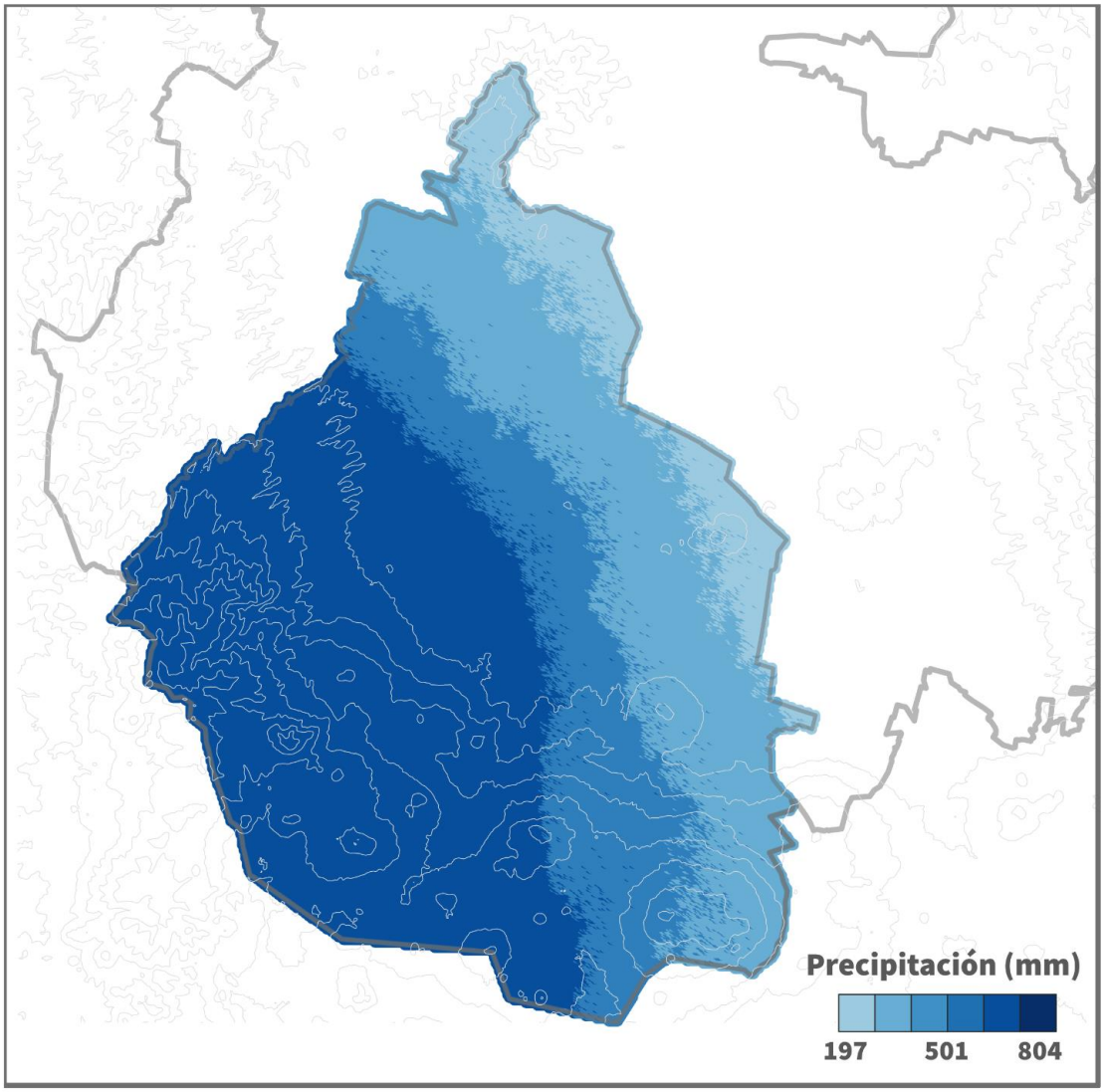


Figura 5.3. Distribución espacial de la precipitación durante la campaña 2020 de la REDDA.

pH

El pH natural del agua de lluvia es 5.6, es ligeramente ácido debido al CO_2 atmosférico que reacciona y forma ácido carbónico que está clasificado como ácido débil; sin embargo, las emisiones de gases contaminantes que son precursores de lluvia ácida (dióxido de azufre – SO_2, y óxidos de nitrógeno – NOx), alteran la química y acidez de la lluvia, forman ácidos fuertes como el ácido sulfúrico y ácido nítrico. La presencia de estos ácidos fuertes ocasiona que el agua de lluvia tenga un valor de **pH menor a 5.6**, fenómeno al que se denomina lluvia ácida (Sosa et al., 2023).

En el análisis por mes, la mayoría de muestras ácidas (**pH < 5.6**) durante la campaña se recolectaron en julio con el 43 % del total, seguido de septiembre con 36 %, 18% en agosto y octubre con 4 %.

A nivel estación (**Tabla 5.1**), el pH máximo se registró en MON con 7.93 y se presentó en la penúltima semana de septiembre, mientras que el mínimo de pH fue 4.07 en el sitio COR durante la última semana de julio.

La estación con mayor número de eventos ácidos fue SNT con 7, esto representó el 47 % de sus muestreos totales, mientras que los sitios AJU y EDL registraron 5 eventos cada uno, lo que corresponde al 33 % y 36%, respectivamente. La estación EAJ obtuvo 4 muestreos con pH ácido, que es el 36 % del total de sus datos, esta proporción de eventos ácidos fue similar a la de EDL, debido a que EAJ tiene menos muestreos en la campaña. Las estaciones con menos eventos ácidos fueron COR, LAA y TLA con 2 en cada una y MCM con 1, lo cual representó menos del 15 % del total de sus muestreos y el sitio MON fue el único que no tuvo muestras ácidas. Estos resultados indican que las estaciones con mayor cantidad de eventos ácidos se localizan al oeste y suroeste de la ZMCM, mientras que en el norte y noreste se contabilizaron menos eventos. Esta distribución de muestras ácidas ha sido constante a través del tiempo, en consecuencia, la región sur es la más afectada por la lluvia ácida, lo cual es relevante ya que en esta zona se encuentran las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de la CDMX.

De acuerdo con los Informes anuales de lluvia ácida de la Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX, se ha determinado que la velocidad y dirección del viento influyen notablemente en la concentración de los precursores de la lluvia ácida, ya que se analizaron los patrones de viento durante los eventos ácidos y se concluyó que hay transporte de contaminantes atmosféricos ocasionado por vientos provenientes del norte, noreste y noroeste, lo cual podría estar relacionado con la ocurrencia y frecuencia de los eventos ácidos en los sitios del sur y suroeste de la CDMX (Ávila, 2018).

Tabla 5.1. Resumen de las mediciones de pH durante la campaña 2020 de la REDDA.

ESTACIÓN	pH mínimo	Muestras ácidas	Total de muestras	% Eventos ácidos
AJU	4.29	5	15	33
COR	4.07	2	14	14
EAJ	4.33	4	11	36
EDL	4.41	5	14	36
LAA	4.73	2	17	12
MCM	4.5	1	9	11
MON	6.5	0	9	0
SNT	4.1	7	15	47
TLA	4.7	2	13	15

COMPOSICIÓN IÓNICA

Durante la formación de lluvia ácida, los iones más abundantes son el sulfato (SO_4^{2-}) y el nitrato (NO_3^-), los cuales tienen como precursores a los óxidos de azufre (SOx) y nitrógeno (NOx), respectivamente. Estos precursores se disocian la lluvia mediante procesos químicos y forman ácidos fuertes, los SOx y NOx tienen origen antropogénico (vehículos e industrias) y natural (incendios, emisiones volcánicas, tormentas eléctricas).

Existen otros factores que afectan el pH de la lluvia, se ha documentado que el amonio (NH_4^+) puede neutralizar los aniones sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) y cloruro (Cl^-) (Prieto-Blanco, 2020). En estudios anteriores, se ha determinado que el calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) también contribuyen a la neutralización de la acidez en la lluvia (UNAM, 2017).

En la **Figura 5.4** se presentan los iones más abundantes en 2020, los cuales fueron NH_4^+ (33.8 %), Ca^{2+} (21.7 %), SO_4^{2-} (21.1 %) y NO_3^- (12.9 %). El NH_4^+ tuvo el máximo en MCM con el 38 % de la masa total de la fracción iónica, seguido de COR y EAJ con 37 %; en otras estaciones, el porcentaje fue del 30 al 36 %. Para el Ca^{2+}, su mayor porcentaje fue en LAA con el 31 % y TLA con 29 % del total; mientras que, en el resto de los sitios, su contribución fue del 14 al 24 %. En el SO_4^{2-}, su máximo aporte fue del 25 % en AJU, seguida de SNT y EDL con el 24 % en cada una; en los demás sitios, el SO_4^{2-} representó del 17 al 21 % del total. En los iones de menor contribución y considerando el promedio de todas las estaciones, se determinó que el Cl^- aportó el 5 % de los iones, el Mg^{2+} fue del 2 %, el potasio (K^+) con 0.7 % y para el sodio (Na^+) fue 0.6 %.

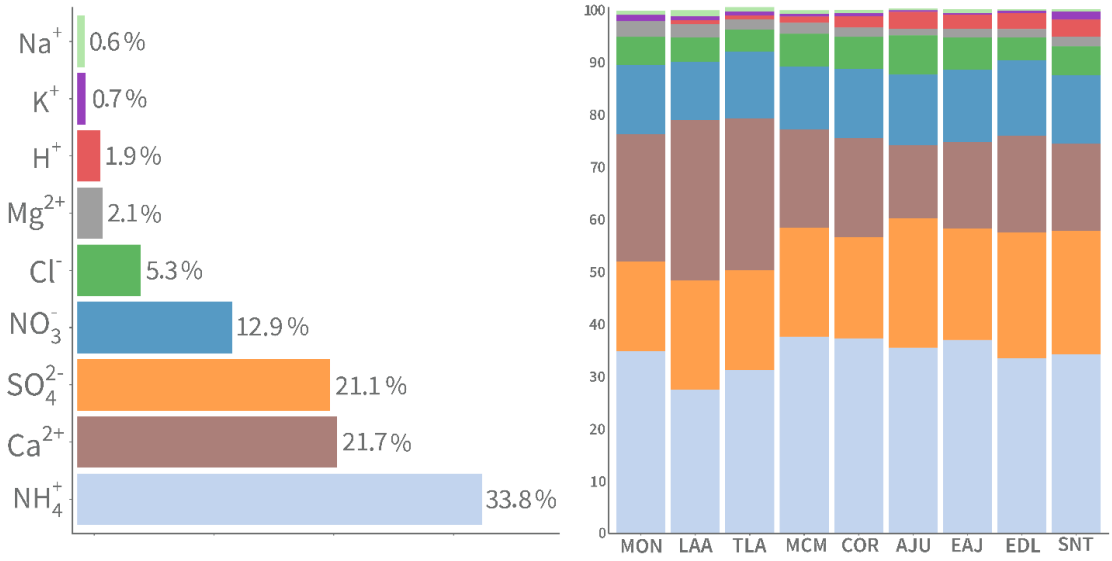


Figura 5.4. Concentración total (µEq/L) de los iones expresada en porcentaje (izquierda) y proporción de los iones por estaciones (derecha).

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO HÚMEDO

Durante la campaña 2020, el promedio del depósito total para los iones fue 11.65 kg/ha para el SO_4^{2-}, el NO_3^- registró 8.85 kg/ha, para el NH_4^+ fue 6.89 kg/ha, en Ca^{2+} se registró 3.8 kg/ha, para el Cl^- fue de 2.1 kg/ha, en el K^+ se obtuvo un promedio de 0.4 kg/ha, mientras que, el Na^+ y Mg^{2+} registraron 0.3 kg/ha cada uno.

El máximo de depósito de SO_4^{2-} se presentó en EDL con 18 kg/ha y el mínimo fue de 4 kg/ha en la estación MON. Para el NO_3^-, el máximo se registró en EDL con 13.2 kg/ha y su mínimo fue 4.1 kg/ha en MON.

El máximo del ion NH_4^+, se presentó en EAJ con 9.5 kg/ha, mientras que su mínimo fue 3.1 kg/ha en MON.

Para el resto de los iones, los valores máximos se presentaron en TLA para el Ca^{2+}, en EDL para el H^+, mientras que los máximos de Cl^-, Mg^{2+} y K^+ se registraron en la estación SNT (**Figura 5.5**). Los valores mínimos de estos iones se presentaron en la estación MON, que en caso del H^+, su depósito fue 0.0003 kg/ha, el cual se redondeó a cero por el número de cifras significativas.

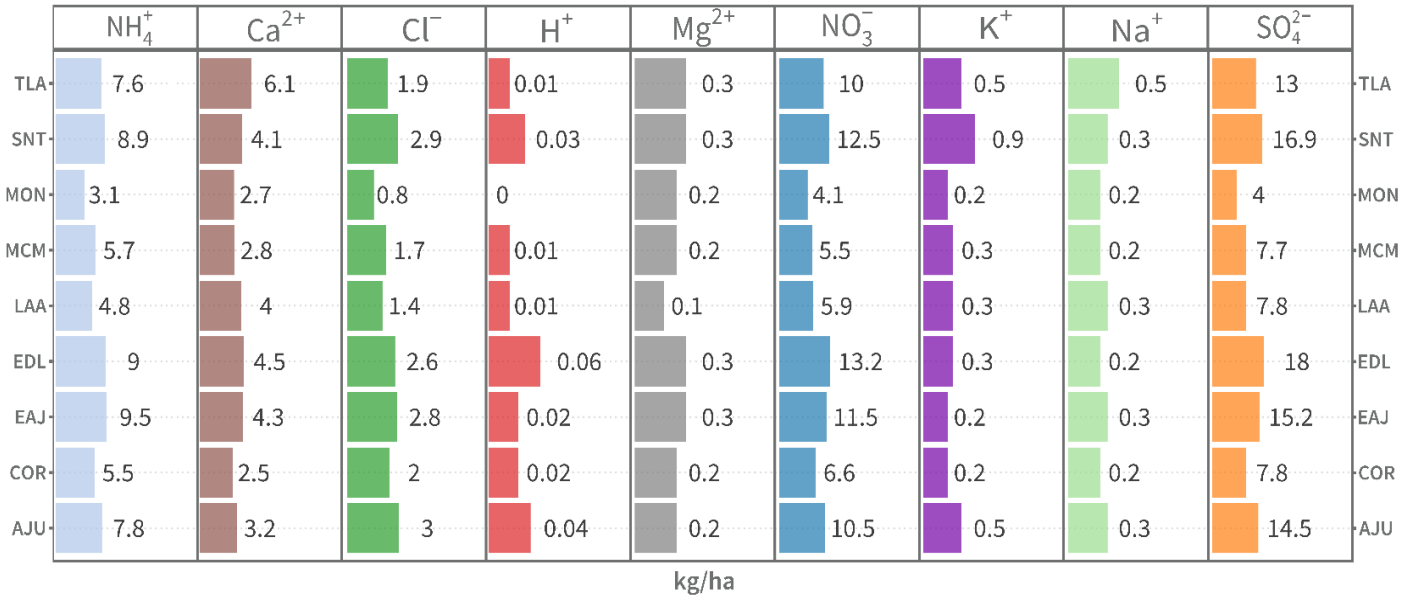


Figura 5.5. Depósito total expresado en kg/ha para cada uno de los iones y estaciones.

INFORME ANUAL
2020

CAPÍTULO 6

PANDEMIA COVID-19 Y CALIDAD DEL AIRE

A finales del 2019 e inicio del año 2020, se presentó un evento epidemiológico a nivel mundial ocasionado por una nueva enfermedad respiratoria que se originaba con el virus SARS-CoV2 (COVID-19). El número de casos de COVID-19 aumentó drásticamente en diversos países por lo que el 11 de marzo del 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró la pandemia por COVID-19.

En México la cronología de eventos se presenta en la **Figura 6.1**; la **Fase 1** de la **contingencia sanitaria** inició con el primer caso en el país, registrado el 27 de febrero del 2020 y en esta misma fecha se publicaron las primeras medidas de control de la Secretaría de Salud (SSA). A partir del 16 de marzo, comenzó la suspensión de clases presenciales a nivel básico, medio superior y superior (DOF, 2020a); inicialmente esta suspensión sería hasta el 17 de abril; sin embargo, este plazo se cambió al 30 de abril (DOF, 2020b). El 23 de marzo del 2020 se declaró la **Fase 2** de la contingencia sanitaria (inicio de dispersión comunitaria), con esto comenzó la **Jornada Nacional de Sana Distancia (JNSD)** y se publicó el Acuerdo para establecer medidas preventivas de mitigación y control de los riesgos para la salud. Las acciones más importantes de la JNSD fue el distanciamiento social, la cancelación o reprogramación de eventos sociales y masivos (> 100 personas), así como la suspensión temporal, de toda actividad laboral que implique movilidad de personas para evitar aglomeraciones en el trasporte público (DOF, 2020c).

El 31 de marzo, se declaró la **Fase 2 - Emergencia Sanitaria** y con esto, se seleccionaron las actividades **esenciales** y se suspendieron aquellas que no cumplían con los criterios; se continúa con las medidas de distanciamiento social y suspensión de clases. El 21 de abril se declaró la **Fase 3 de la contingencia sanitaria**, debido a la gravedad e incremento de casos COVID-19 y continuó la suspensión a nivel nacional de toda actividad no esencial tanto en el sector público como privado. A mediados de mayo se anunció el plan de reactivación llamado "**Regreso a la nueva normalidad**" donde se presentó la estrategia de reapertura gradual de actividades económicas, educativas y sociales, además se anunció el "**Semáforo de riesgo epidemiológico**" que indicaba el grado de peligro de contagio a partir de la cantidad de casos confirmados y sospechosos de COVID-19, ocupación hospitalaria y tendencia de hospitalizaciones. El 31 de mayo finalizó la JNSD e inició el semáforo nacional; comenzó la reapertura de algunas actividades de acuerdo al nivel de riesgo indicado en el semáforo.

En la CDMX, las medidas de restricción iniciaron el 19 de marzo, debido a la elevada densidad poblacional, así como la gran afluencia de trabajadores y estudiantes que se movilizan hacia sus centros laborales o de estudio en la ciudad. Adicionalmente se implementó el trabajo remoto para los trabadores del gobierno de la CDMX.

Figura 6.1. Cronología de la contingencia sanitaria por COVID-19 en México.

IMPACTO DE LA PANDEMIA EN LA MOVILIDAD DE LA CDMX

De acuerdo con la encuesta de origen-destino del 2017 realizada por INEGI, se estima que 15.63 millones de personas realizan al menos un viaje diario dentro de la ZMCM. Esto equivale a un total semanal de 34.56 millones de viajes; de los cuales el 45% (15.57 millones) se realiza en transporte público (INEGI, 2018). Adicionalmente, se estima que en la CDMX diariamente circulan 5 millones de automóviles locales, a los que se suman casi de 2 millones que ingresan diariamente (UNAM, 2018). Como se mencionó anteriormente, las dependencias de la CDMX, así como, algunas oficinas e industrias del sector privado, se sumaron a las restricciones de movilidad para lograr reducir la afluencia de personas, lo cual se observó claramente en la disminución del tránsito vehicular en la CDMX.

En la **Figura 6.2** se presenta el **porcentaje de reducción** del tránsito vehicular en la ZMCM, el cual se obtuvo con datos de la Secretaría de Movilidad (SEMOVI). Se hizo una estimación del tránsito de una "**semana típica**" (lunes a domingo) y se comparó con el tránsito diario desde el inicio de la contingencia sanitaria. Se presentó una reducción drástica en el 9 y 16 de marzo, pero esto corresponde al paro nacional de

mujeres y el día de asueto, respectivamente. A partir del 19 de marzo, comienza una reducción constante en el tránsito vehicular, que es más notable desde el 26 y 27 de marzo, posterior al decreto nacional de suspensión temporal de labores (**Fase 2**). Durante la Semana Santa (5 al 11 de abril) el tránsito incrementó ligeramente, en especial el domingo 5 de abril; sin embargo, durante el resto del periodo analizado, el **porcentaje de reducción** osciló entre 60 y 80%.

A finales de mayo e inicios de junio, se observó una tendencia de aumento del tránsito vehicular, lo que se relaciona con el regreso gradual a la "nueva normalidad" y aplicación del semáforo epidemiológico nacional. En la ZMCM, solamente algunas actividades consideradas esenciales fueron permitidas; sin embargo, de acuerdo con los datos de movilidad, el aumento del tránsito en las últimas semanas fue un indicador de que la población reanudó diversas actividades.

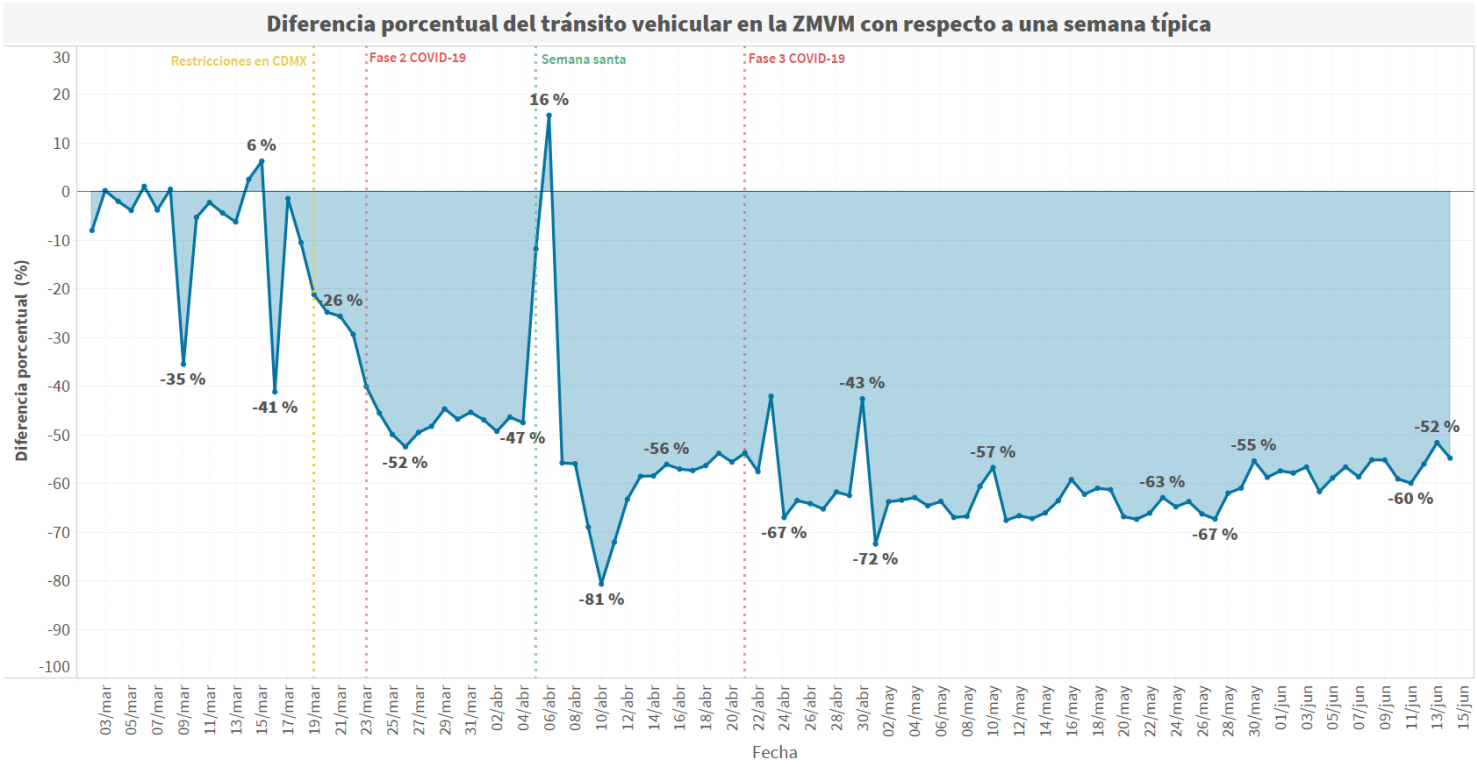


Figura 6.2. Diferencia porcentual del tránsito vehicular con respecto a días típicos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

ANÁLISIS DE LOS CONTAMINANTES DURANTE LAS RESTRICCIONES DE MOVILIDAD

En esta sección se comparó la concentración del monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), en dos periodos: **antes y durante** las restricciones de la pandemia; con el fin de relacionar los niveles de estos contaminantes con la reducción del tránsito vehicular. Se consideraron los datos horarios en todas las estaciones de la ZMCM (excepto transporte: ACO, AJU, MPA, INN y MON) y se dividieron en dos grupos:

- **Grupo 1: Antes** años anteriores (abril y mayo de 2015 a 2019)
- **Grupo 2: Durante** las restricciones (abril y mayo del 2020).

En cada grupo se obtuvo el perfil horario por y se determinaron las diferencias por hora. También se calculó la concentración promedio en cada grupo (media de los datos horarios) y se obtuvo el **porcentaje de cambio**.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono (CO) está directamente relacionado con las emisiones vehiculares, debido a esto, en la comparación de grupos, se obtuvo una reducción del 52.7 % en la concentración promedio (**Figura 6.3a**). En los perfiles horarios (**Figura 6.3b**) también se presenta una disminución de la concentración, especialmente en las horas que están relacionadas con mayor tránsito vehicular (07:00 a 10:00 h) y a las 07:00 h obtuvo la mayor reducción (0.600 ppm). En la serie de tiempo con el máximo, promedio y mínimo diario (**Figura 6.3c**) se presenta el comportamiento del CO por día de la contingencia COVID-19, y a partir del 23 de marzo, se observa el descenso en la concentración máxima.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO, NO_2 Y NO_X)

Los óxidos de nitrógeno provienen principalmente de fuentes móviles, al igual que CO, por lo que fue también relevante vigilar su comportamiento durante las restricciones de movilidad. Se observó una reducción importante en la concentración de los tres óxidos de nitrógeno: NO con 62.2%; NO_2 con 35.8% y NOx con 44.7% (**Figuras 6.4a, 6.5a** y **6.6 a**).

En el comportamiento de los perfiles horarios del NO y NOx (**Figuras 6.4b y 6.6b**), se observó que en las horas del máximo (07:00 a 09:00 h) hubo una reducción importante de concentración, con una disminución de **37.8 ppb** a las 07:00 h para NO y de **44.2 ppb** para NOx a la misma hora.

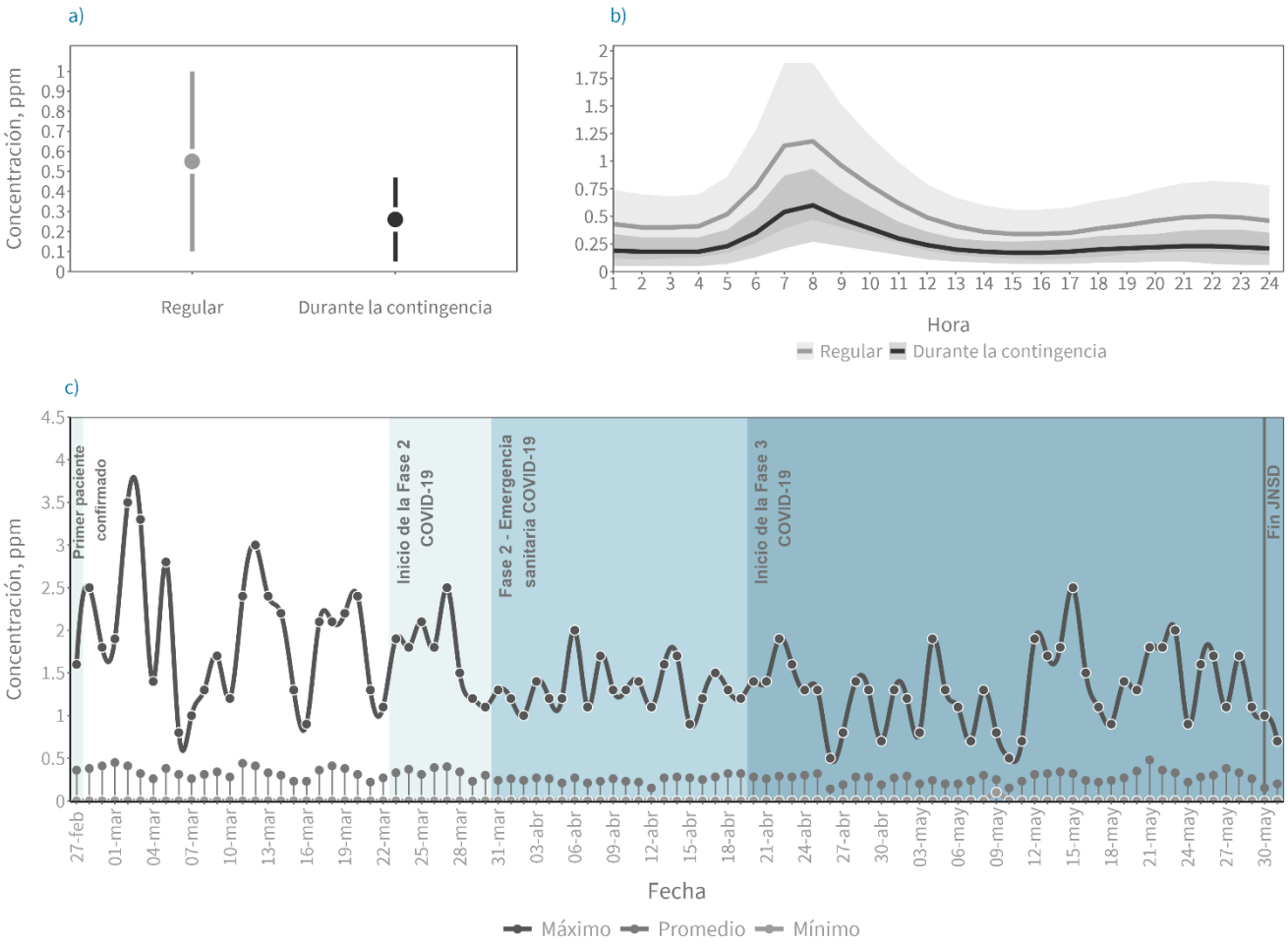


Figura 6.3. a) Promedio y desviación estándar de CO. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

En cuanto al NO_2, además de la disminución en las horas del pico, también se presenta un corrimiento del máximo (**Figura 6.5b**), ya que antes de las restricciones, el máximo de NO_2 ocurrió de 08:00 a 10:00 h y durante las restricciones, fue de 07:00 a 09:00 h. El perfil horario típico del NO_2 es bimodal, ya que presenta dos máximos en el día; sin embargo, en el grupo 2, el segundo máximo se atenuó considerablemente. La reducción de mayor magnitud se observó a las 10:00 h con **12.4 ppb**.

En las series de tiempo (**Figuras 6.3c, 6.4c y 6.5c**) hay una tendencia de reducción desde el 23 de marzo (**Fase 2**) y es más notable a partir del 31 de marzo, cuando se declaró la Emergencia Sanitaria con restricciones para actividades no esenciales. Sin embargo, hay un incremento de los máximos diarios para el 24 y 25 de marzo, que se relacionó con un sistema de alta presión persistente durante cuatro días, que ocasionó estabilidad atmosférica y acumulación de contaminantes.

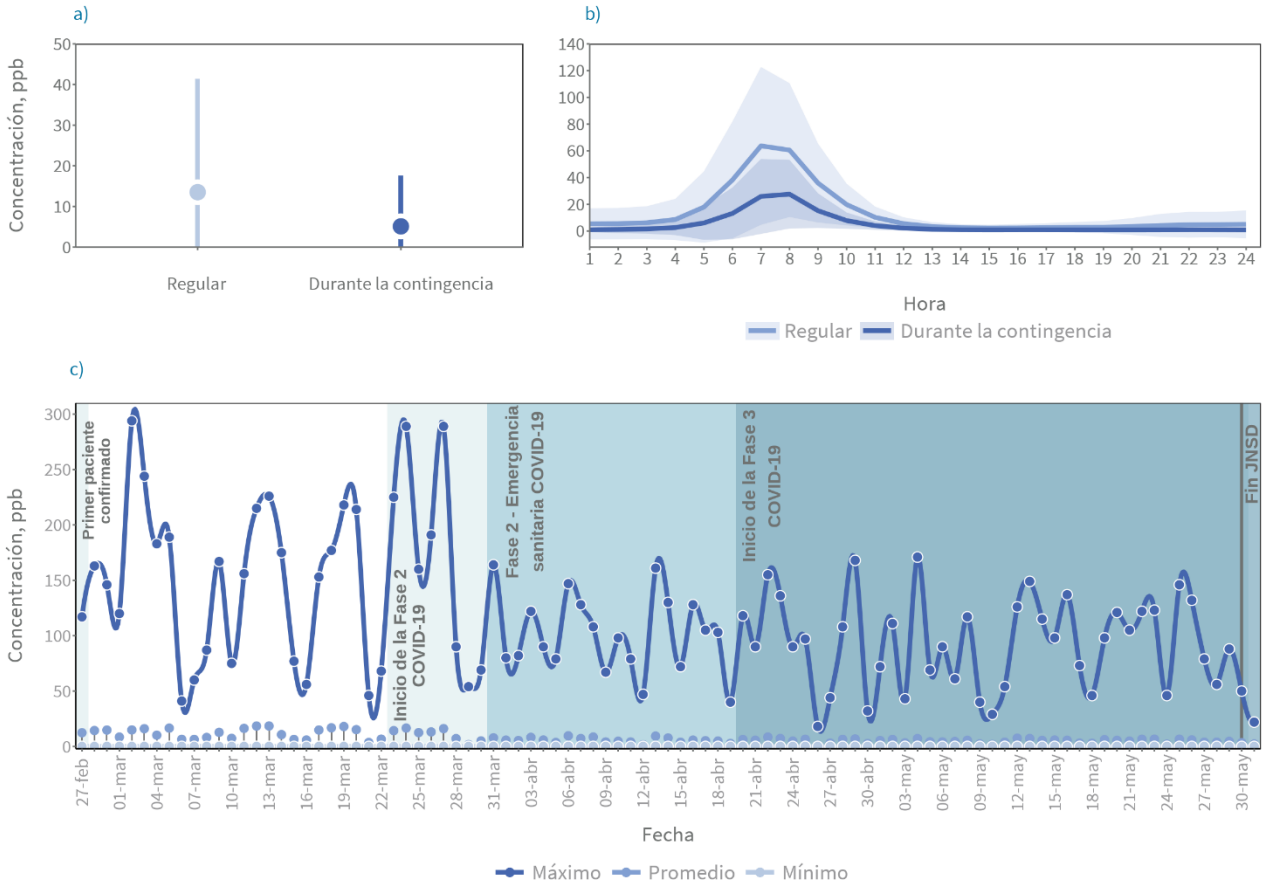


Figura 6.4. a) Promedio y desviación estándar de NO. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

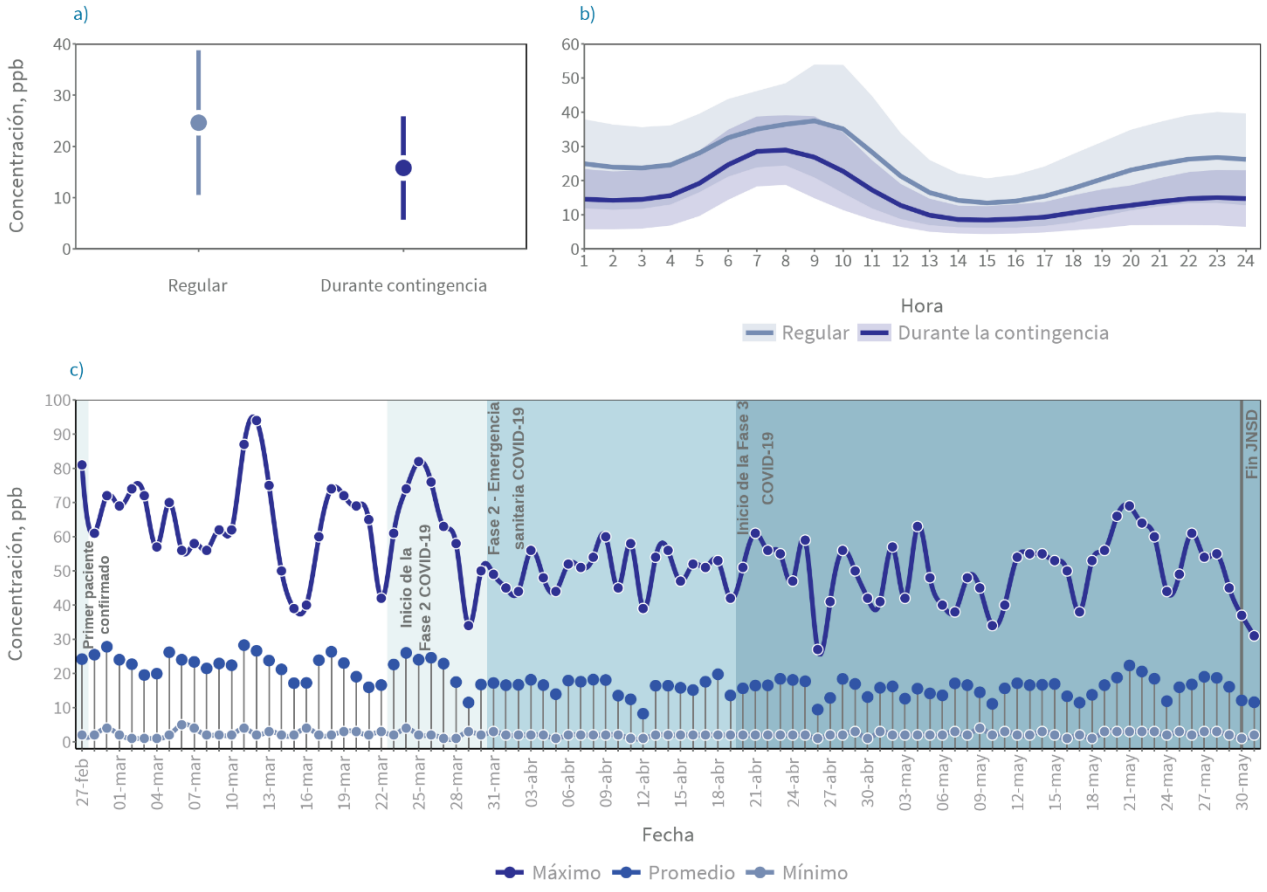


Figura 6.5. a) Promedio y desviación estándar de NO_2. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

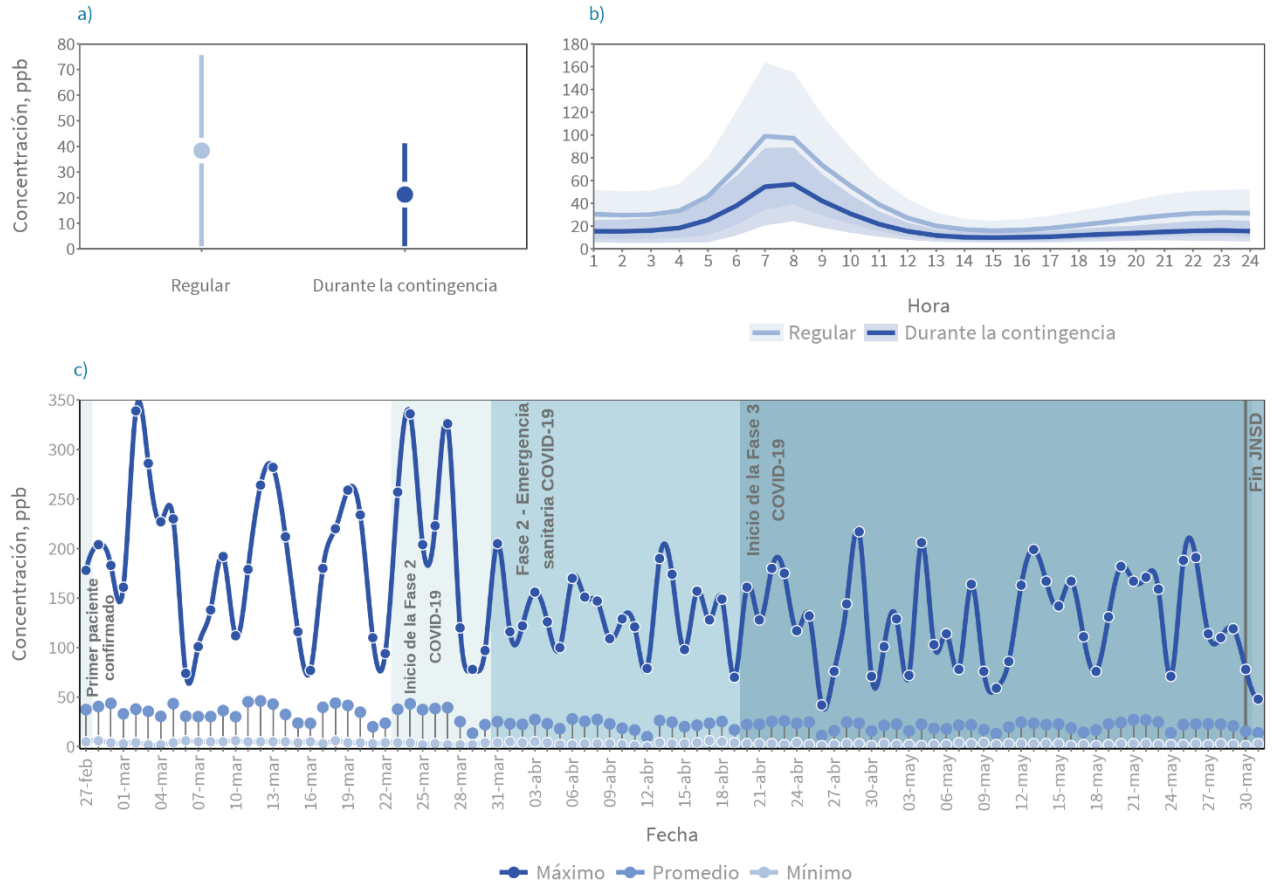


Figura 6.6. a) Promedio y desviación estándar de NO_x. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS PM_{10} Y $PM_{2.5}$

Las partículas suspendidas tienen una gran cantidad de fuentes de emisión, sin embargo, las emisiones vehiculares son una fuente importante, también los incendios aportan una porción importante sobre todo en la época seca-caliente es cuando más frecuentemente se presentan estos eventos. Durante 2020, hubo varios episodios de incendios en marzo, abril y mayo y a pesar de eso se observó una reducción en la concentración de las partículas: con 14.3% para PM_{10} y 12.6 % para PM2.5 (**Figuras 6.7a** y **6.8a**).

En el comportamiento del perfil horario además de la disminución en las horas del pico, también se presenta un corrimiento del máximo en ambas fracciones de las partículas (**Figura 6.7b** y **6.8b**), ya que antes de las restricciones, el máximo de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se presentaba entre las 08:00 a 10:00 h y durante las restricciones, fue de 09:00 a 11:00 h. La reducción de mayor magnitud para las PM_{10} se observó a las 08:00 h con **21.5 µg/m³**, en cuanto a las $PM_{2.5}$, la mayor reducción se registró a las 10:00 h con **9.3 µg/m³**.

En las series de tiempo (**Figuras 6.7c y 6.8c**) no se observa una clara tendencia de reducción debido a la gran variedad de fuentes de emisión de las partículas y en el caso de los máximos hay una influencia de los incendios que no permite ver la reducción debido a otras fuentes.

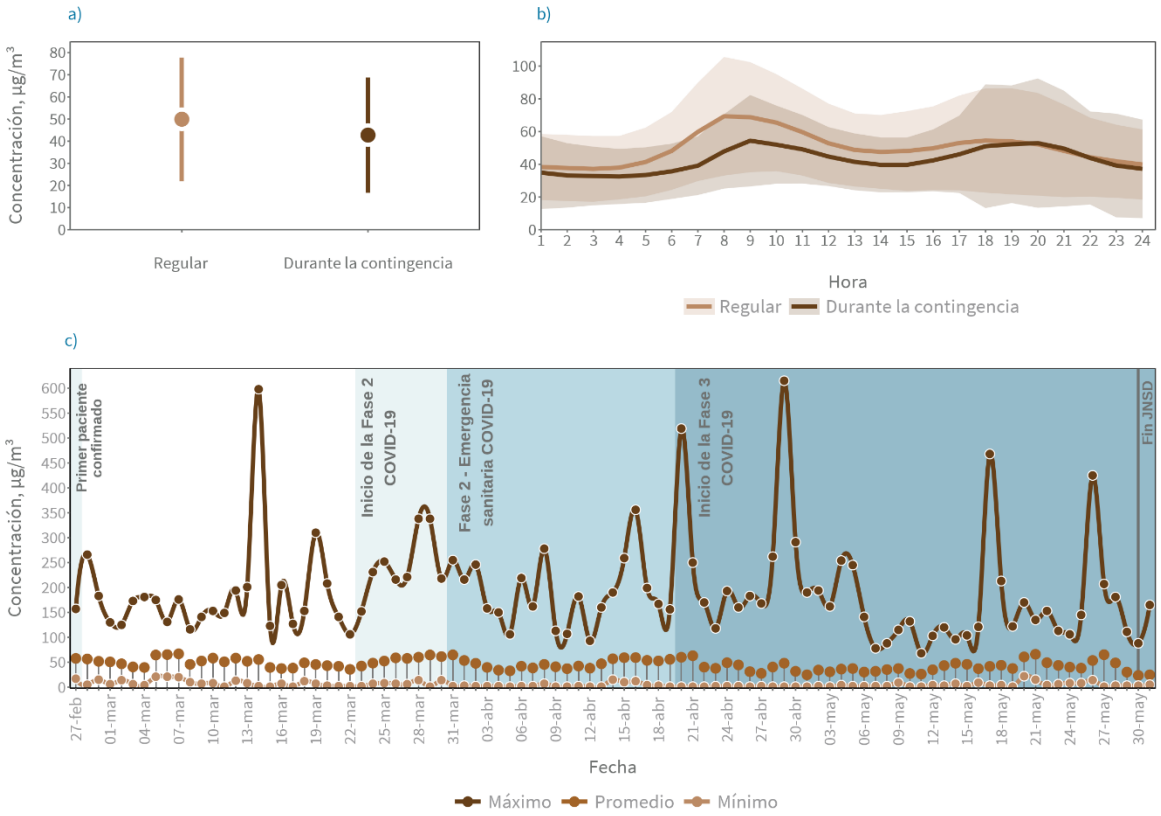


Figura 6.7. a) Promedio y desviación estándar de PM_{10}. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

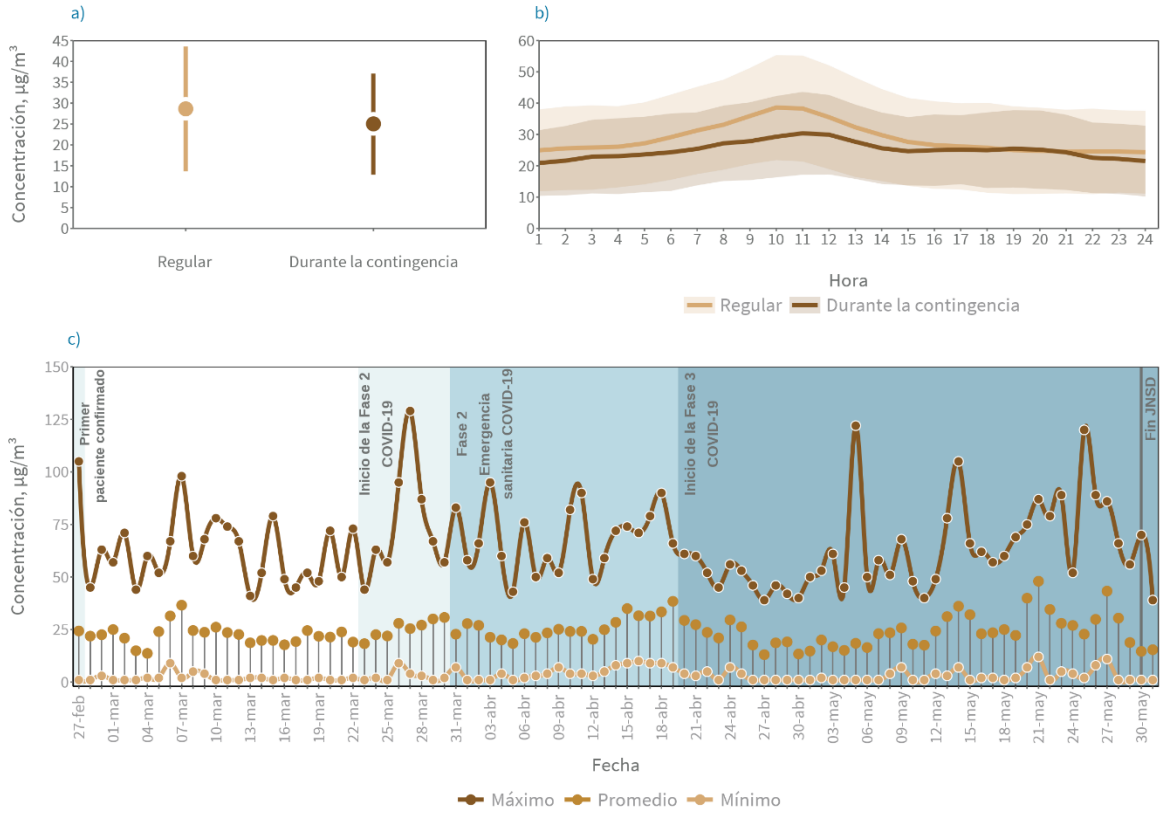


Figura 6.8. a) Promedio y desviación estándar de $PM_{2.5}$. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

OZONO

El ozono como contaminante secundario depende de sus precursores y la relación de estos para su formación, durante la pandemia como se observó en la sección de los óxidos de nitrógeno hay una reducción importante en la concentración de estos, sin embargo, no se tienen mediciones sobre los COV para determinar su reducción durante la pandemia. En atmósferas sensibles a COV o NOx saturado, ocurre que el NOx adicional sirve como sumidero de radicales OH, y esto ralentiza la oxidación de los COV y suprime la producción de O_3, además el NOx secuestra el O_3 en depósitos temporales como NO_2 y N_2O_5. La química tiene implicaciones importantes para la relación entre las emisiones y la calidad del aire porque en estas condiciones, las emisiones más bajas de NOx conducen a niveles más altos de O_3 (Kroll, et Al. 2020) y este comportamiento se observó durante la pandemia para el caso del ozono sobre todo en las concentraciones medias, se obtuvo un incremento del 11.5 % en la concentración promedio (**Figura 6.9a**). En los perfiles horarios (**Figura 6.9b**) se presenta un incremento de la concentración, especialmente en las horas de la tarde-noche y madrugada esto es de las 18:00 h a las 07:00 h que están relacionadas con las emisiones de NOx y al reducirse estas se incrementa el O_3, el mayor incremento se registró a las 24 h con **8.9 ppb** y el mayor decremento se presentó a las 14:00 con **0.6 ppb**, que es cuando normalmente se registra el valor máximo de O_3 (**Figura 6.9c**). Como se señala en la siguiente sección en los máximos si hay un ligero decremento, como se observa a partir del 20 de abril y hasta el 31 de mayo, en cambio en el valor promedio se ve un ligero incremento que se mantiene desde el 1 de abril hasta el 30 de mayo.

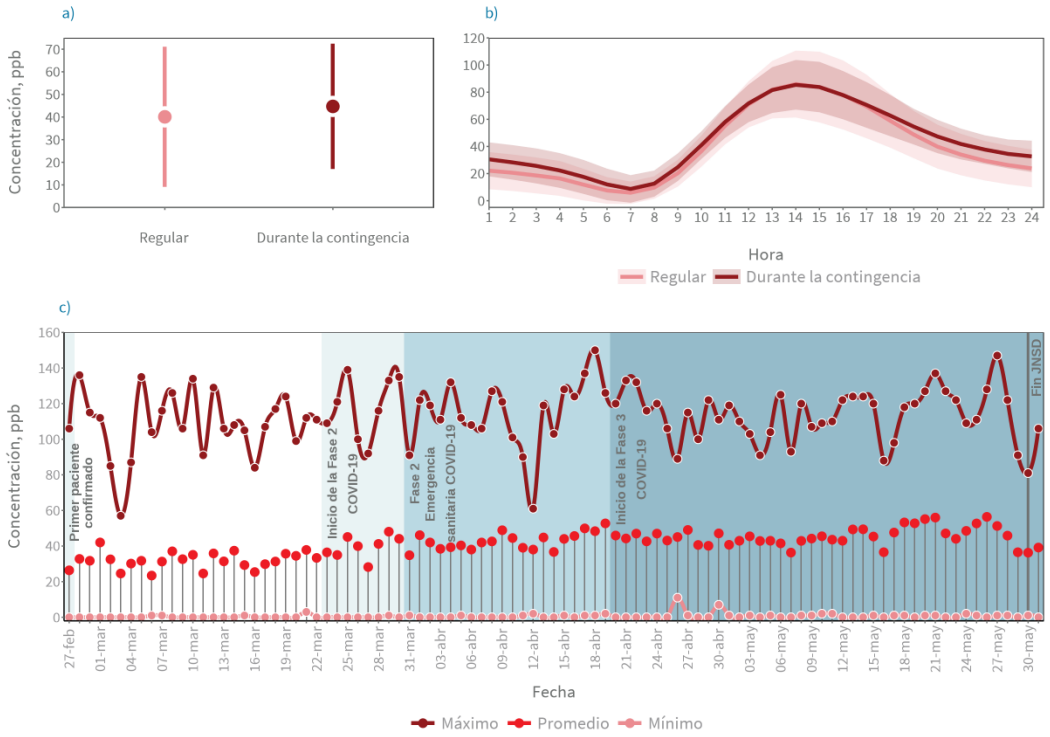


Figura 6.9. a) Promedio y desviación estándar de O_3. **b)** Perfil horario. La línea es el promedio y la zona sombreada es la desviación estándar. **c)** Comportamiento del máximo, promedio y mínimo diario.

ANÁLISIS SEMANAL DE LOS CONTAMINANTES EN 2020 y AÑOS ANTERIORES (MARZO A MAYO).

En esta sección realizó la comparación de los contaminantes criterio durante 2020 y en años anteriores, para observar su cambio en la concentración en los meses de seca caliente (marzo a mayo). Para la comparación de los valores obtenidos en el periodo de 2020, se utilizaron los indicadores: **promedios semanales**, **promedio de los máximos** y **diferencias porcentuales**. Se determinó una semana típica con los meses de marzo a mayo del 2015 al 2019, la cual fue utilizada como "línea base" para realizar la comparación.

PORCENTAJES DE CAMBIO SEMANALES: MÁXIMOS Y PROMEDIOS DIARIOS.

Para calcular la línea base de los contaminantes, se realizó el siguiente procedimiento:

a) Determinar promedios y máximos diarios para cada contaminante por separado (CO, NO_2, NO, NOx, O_3, $PM_{2.5}$ y PM_{10}).

b) Se determinaron dos indicadores semanales: la media semanal de los promedios diarios (**MD**) y la media semanal de los máximos diarios (MS).

$$\mathbf{MD} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \text{Promedio}_{\text{diario}}}{N}$$

$$\mathbf{MM} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \text{Máximo}_{\text{diario}}}{N}$$

Donde:

MD es la media semanal de los promedios diarios

MM es la media semanal de los máximos diarios y

N es el número de días en la semana (lunes a domingo, 7)

c) Obtención del **valor base** de los indicadores semanales con información de marzo a mayo del 2015 – 2019. La **Tabla 6.1** contiene la línea base para cada contaminante analizado.

Tabla 6.1. Indicadores semanales para la línea base de cada contaminante.

Indicador semanal (línea base)	CO (ppm)	NO (ppb)	NO_2 (ppb)	NOx (ppb)	O_3 (ppb)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	PM_{10} ($\mu g/m^3$)
MM_{LB}	2.624	191.28	70.75	235.56	118.79	77.82	189.76
MD_{LB}	0.547	13.83	24.61	38.55	38.94	27.61	50.18

d) Obtención del porcentaje de cambio, entre los valores base y los de cada semana transcurrida del 2020, se aplicó la siguiente fórmula:

$$\textbf{\% cambio prom. día} = \left(\frac{MD_{2020} - MD_{LB}}{MD_{LB}}\right) x100$$

$$\textbf{\% cambio máx.} = \left(\frac{MM_{2020} - MM_{LB}}{MM_{LB}}\right) x\ 100$$

Donde:

MD_{2020} es la media semanal de los promedios diarios de la semana del 2020.

MM_{2020} es la media semanal de los máximos diarios de la semana del 2020

MD_{LB} es la media semanal de los promedios diarios de la semana base (2015 – 2019).

MM_{LB} es la media semanal de los máximos diarios de la semana base (2015 – 2019).

RESULTADOS

En los contaminantes primarios se observó una considerable reducción en los valores semanales del promedio y máximo, que comenzó desde la primera semana de la JNSD, en la cual hubo mayor restricción de movilidad, así como la suspensión de actividades escolares.

En el caso de CO (**Figura 6.10**), se observó la mayor reducción durante la semana del 4 al 10 de mayo (**Fase 3**), con una disminución en el máximo y promedio diario del -59 % y -58 %, respectivamente. Esta reducción se puede relacionar con el inicio de la **Fase 3**, el 21 de abril, con la que aumentaron las restricciones de movilidad en la CDMX. La menor reducción se observó durante la primera fase de restricción (23 al 29 de marzo) con disminución del 30 % en el máximo y 36 % en la media diaria.

Para los NOx, fue similar al comportamiento del CO, se puede observar en la **Figura 6.11, 6.12** y **6.13**, que la mayor reducción se presentó durante la semana del 4 al 10 de mayo (**Fase 3**). En el NO, se registraron disminuciones del 57 % en el máximo y 69 % en el promedio diario; en el caso del NO_2 fue una reducción del máximo y promedio diario del 36 % y 40 %, respectivamente. Finalmente, para óxidos de nitrógeno (NOx), la mayor disminución fue del 51 % en el máximo y 50 % en el promedio diario. La mínima reducción ocurrió durante la primera semana de la **Fase 2** de contingencia sanitaria (23 al 29 de marzo) con porcentajes de disminución para el máximo y promedio diario de: NO con 3 % y 16 %; NO_2 con 10% y 11%; NOx con 6% y -13%.

Para ozono (**Figura 6.14**), la tendencia de ambos indicadores se mantuvo constante, ya que en el transcurso de las semanas en 2020 no se observó una reducción importante como ocurre con los contaminantes primarios. En la semana del 6 al 12 de abril (**Fase 2**), los máximos se redujeron en un 14 % con respecto a la semana típica; sin embargo, el indicador diario aumentó en 8%. Los mayores porcentajes de incremento en la

concentración de ozono fueron del 18 al 24 de mayo, con un 3 y 31 %, en el promedio diario y en el máximo, respectivamente.

Las PM_{10} (**Figura 6.15**) tuvieron la mayor reducción durante la semana del 4 al 10 de mayo con 21 % en el valor máximo y 33 % en el promedio diario. Sin embargo, en semanas previas, el máximo aumentó en 32 % del 23 al 29 de marzo (**Fase 2**) y del 42 % en la semana del 27 de abril al 3 de mayo (**Fase 3**). Esto pudo ser ocasionado por incendios dentro y fuera de la ZMCM, ya que, de acuerdo con reportes de CONABIO y CORENA, se registraron 191 y 252 incendios en esas dos semanas (CORENA, CONABIO, 2020).

En $PM_{2.5}$ (**Figura 6.16**), la variación semanal fue mayor que en PM_{10}. Se registraron reducciones en la semana del 27 de abril al 3 de mayo (**Fase 3**), con una disminución del 40% para el valor máximo y del 41% para la media diaria. Sin embargo, del 13 al 19 de abril y del 18 al 24 de mayo, hubo incrementos en el promedio diario, donde se determinó un porcentaje de aumento del 15 y 16 %, respectivamente; esto también pueden estar relacionados con el número de incendios dentro y en los alrededores de la ZMCM durante abril y mayo.

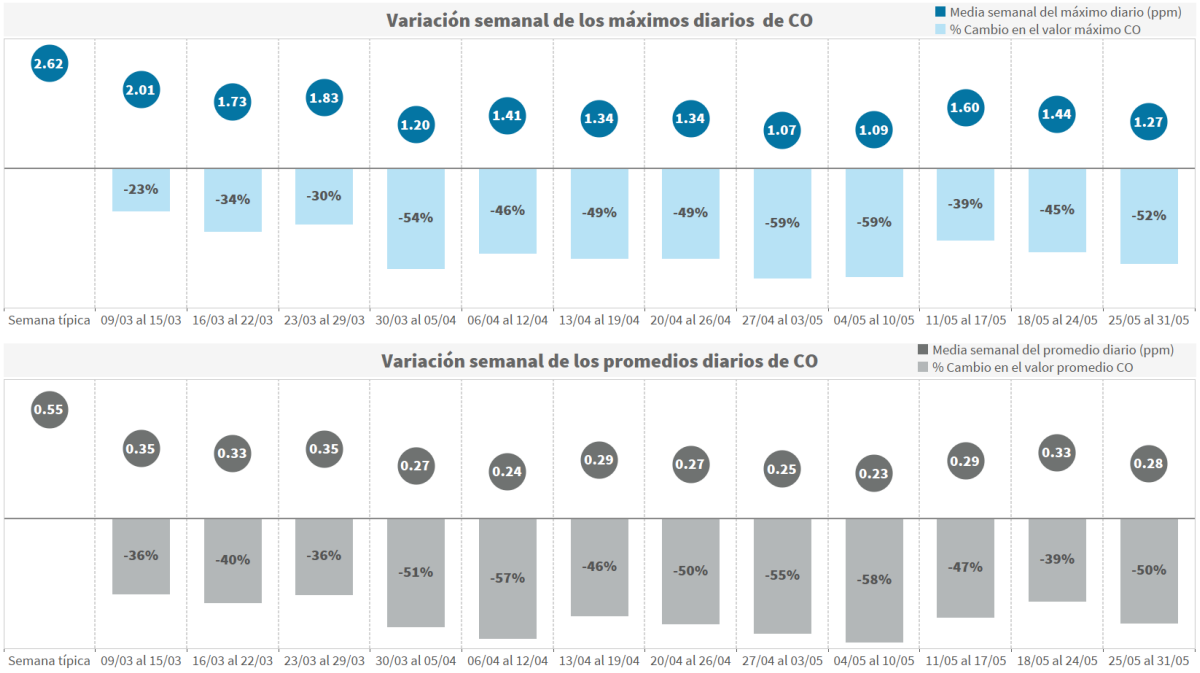


Figura 6.10. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima del monóxido de carbono.

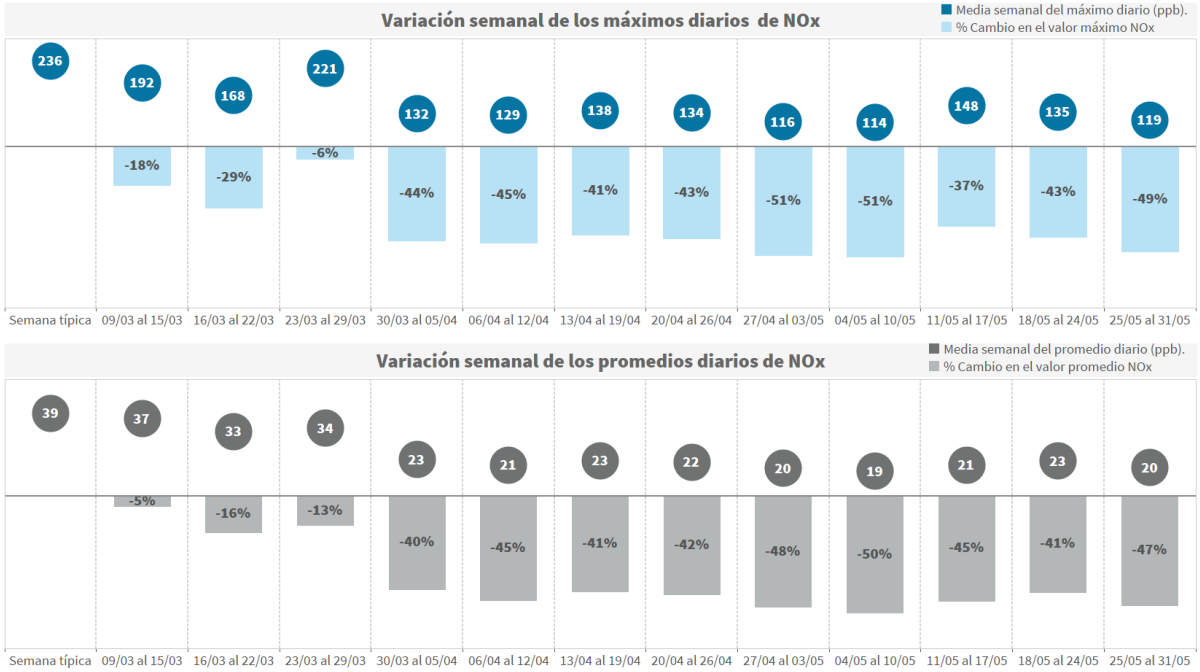


Figura 6.11. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima de óxidos de nitrógeno.

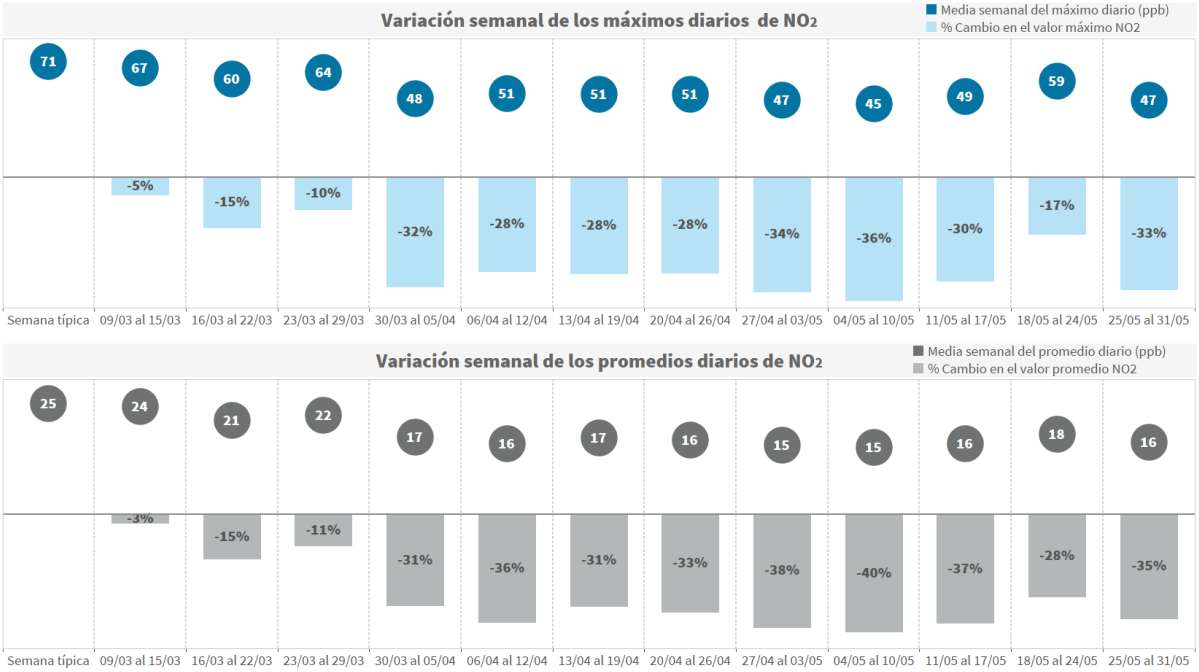


Figura 6.12. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima del dióxido de nitrógeno.

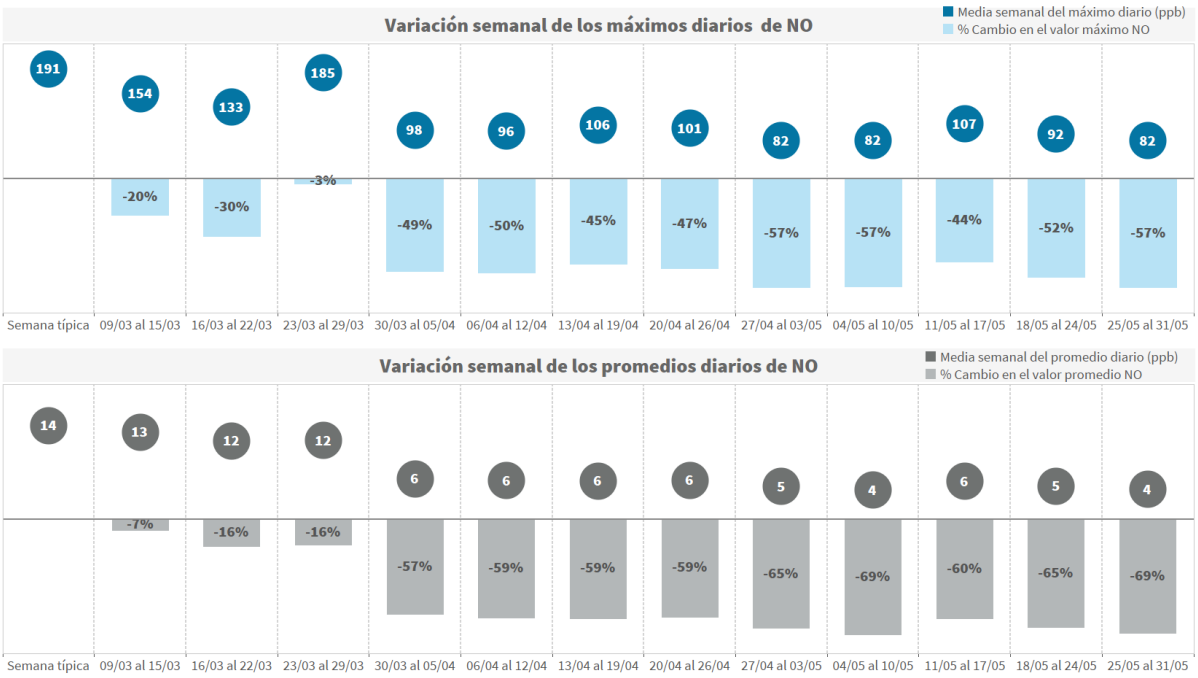


Figura 6.13. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima de óxido nítrico

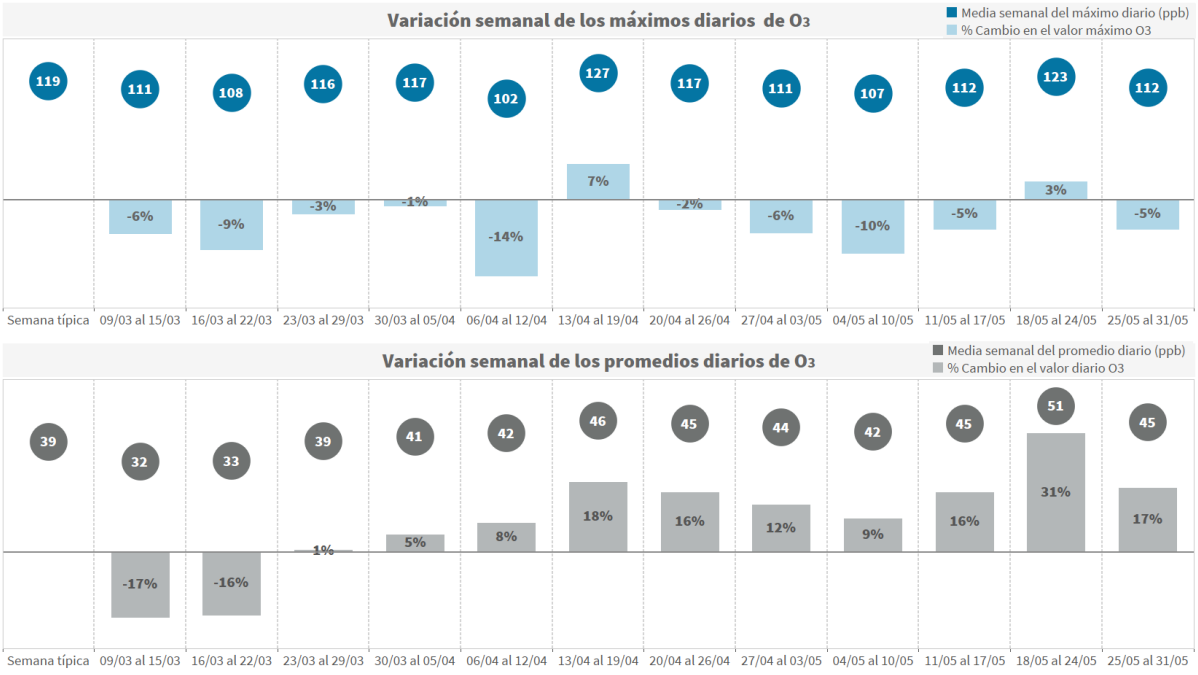


Figura 6.14. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima del ozono.

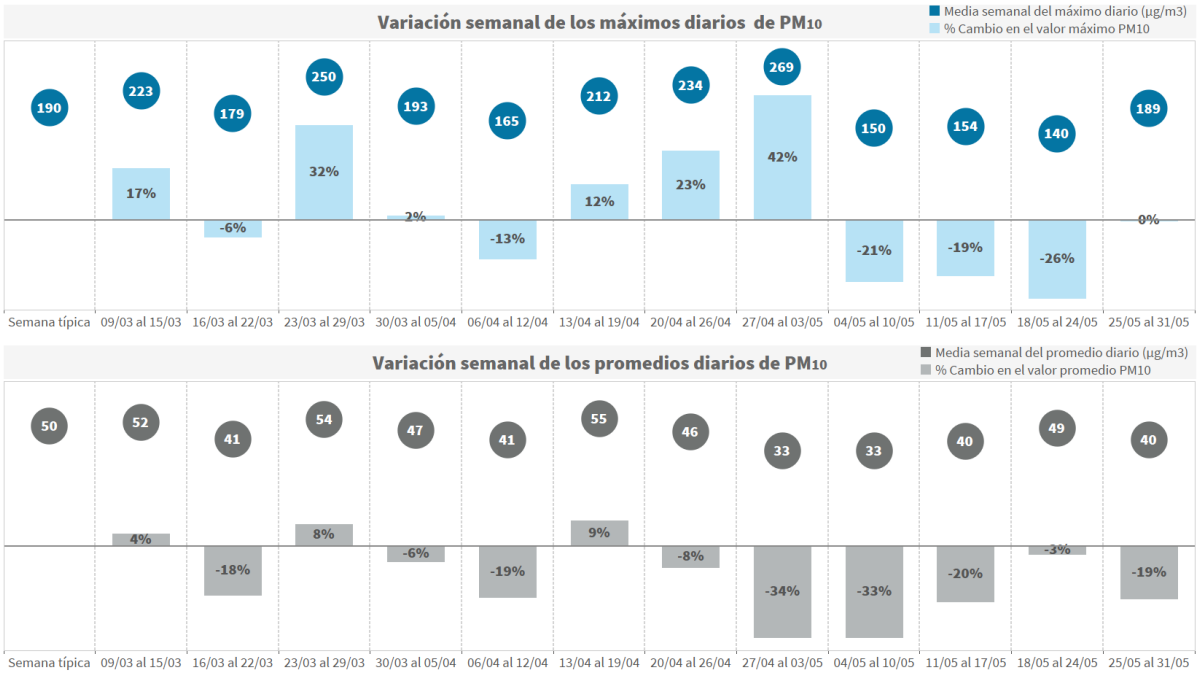


Figura 6.15. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima de PM_{10}.

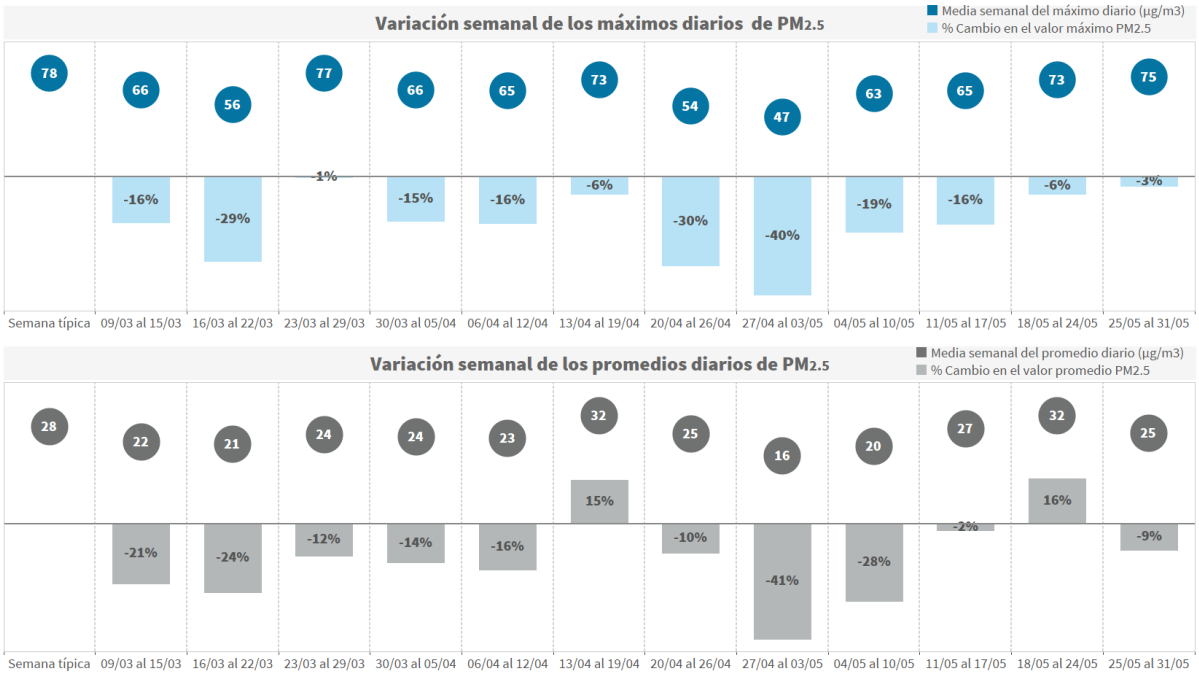


Figura 6.16. Comportamiento semanal de la concentración diaria y máxima de $PM_{2.5}$.

ANÁLISIS DE MÁXIMOS POR AÑO

Se consideraron los **máximos diarios** de marzo a mayo en cada año del 2010 al 2020 y se utilizaron las estaciones de la ZMCM que contaban con suficiencia de información al menos en los meses analizados además de que se excluyeron las estaciones de transporte (ACO, AJU, INN, MON, MPA). Se determinó la distribución por intervalos de concentración máxima diaria por contaminante y se observó su comportamiento por año. Este análisis tiene como objetivo principal identificar la tendencia que tuvieron los valores máximos durante 2020, y determinar si cambiaron los patrones que se habían registrado en años anteriores durante las mismas fechas.

En el caso del CO durante 2020, la mayoría de los máximos diarios estuvieron por debajo de 2 ppm, y la proporción de los máximos en valores mayores a 2.1 ppm fue menor que en años anteriores (**Figura 6.17**). Es importante mencionar que desde 2017 se observa un aumento de la proporción de los máximos con valor ≤ 2 ppm; sin embargo, en 2020 es más notorio ya que de un total de 92 días analizados de cada año; en 2017 la proporción de estos máximos fue del 38 % (35 días), en 2018 del 46% (42 días), al siguiente año, 2019 fue del 51 % (47 días) y finalmente en 2020, el porcentaje se elevó a 89% (82 días), esto fue consecuencia de la reducción en las emisiones vehiculares.

En el caso del óxido nítrico y dióxido de nitrógeno, NO y NO_2, se observó una disminución importante de los valores máximos registrados de marzo a mayo, (**Figura 6.18** y **6.19**).

Para NO, la proporción de máximos ≤ 250 ppb, representó un porcentaje del 84% (76 días) para 2017, 85% (78 días) para 2018 y 2019, mientras que para 2020 la proporción aumentó al 97% (89 días). Se puede observar que, en este año, también se duplicó el número de días con máximos ≤150 ppb y que corresponden al 77% de los días, esto es una notable diferencia en comparación con los demás años donde los valores ≤ 150 ppb oscilaron entre el 42 y 47% (39 – 43 días); además, el 2020 fue el único año que no tuvo máximos superiores a 300 ppb.

En el NO_2, la diferencia entre dichos años es mayor, ya que para 2017 y 2018 los máximos ≤ 70 ppb ocurrieron en el 61 y 62 % de los días, respectivamente; mientras que para 2019 fue en el 70% (64 días) y, finalmente en 2020, esta proporción incrementó al 90 % (83 días). Es importante mencionar que, en este año, la proporción de los máximos > 90 ppb es menor en los últimos 10 años, ya que solamente se registraron 9 días (10%), mientras que, en el resto de los años, estos valores se presentaron hasta en el 70% (64) de los días del periodo analizado. Adicionalmente, los máximos de NO_2 ≤ 50 ppb aumentaron en más del doble, en la cantidad de número de días, con un porcentaje que representó el 40% de los días en 2020, mientras que en los otros años, llegó solamente al 15 % (14 días).

En ozono, durante 2020 se observó una distribución de los máximos similar al 2018, donde la mayoría de los máximos diarios fueron menores a 130 ppb, esta proporción ha variado en los últimos 10 años; sin embargo, en 2020 se obtuvo el máximo porcentaje de días con valores inferiores a 130 ppb con 82 de 92 días, lo que representó el 89 %; mientras que en 2018 la proporción de estos máximos fue del 85 % (78 días), seguido del 2012 con el 80% (74 días). Es importante mencionar que, en 2020 la proporción de máximos mayores a 131 ppb disminuyó considerablemente y fue la mínima en los 10 años analizados, ya que solamente en 10 de 92 días (11 %), se presentaron valores entre 131 a 154 ppb (**Figura 6.20**).

Para el análisis de PM_{10}, se observó que el comportamiento y distribución de los máximos es más variable que en el resto de los contaminantes relacionados con tránsito vehicular, debido a que PM_{10}, además de presentar una contribución de los automóviles, también tienen aporte de fuentes de área, así como eventos como incendios forestales y quemas al aire libre (SEDEMA, 2020).

Se observó que los máximos horarios de PM_{10} en 2020 registraron un comportamiento similar al 2012; sin embargo, en 2020 la proporción de máximos con valores bajos ($PM_{10} \leq 150$ µg/m^3) fue mayor (**Figura 6.21**).

En el caso del $PM_{2.5}$, se observó que, en 2020, la mayoría de los máximos diarios estuvieron por debajo de 70 µg/m^3, y la proporción de máximos superiores a 71 µg/m^3 fue menor que en años anteriores (**Figura 6.22**). Es importante mencionar que en 2010 y 2018 se presentaron proporciones similares al 2020, además, en este último año, no se registraron máximos en 151 µg/m^3. En el total de 92 días analizados, en 2020 la proporción de máximos menores a 71 µg/m^3 fue del 73 % (67 días), la mayor desde 2010 donde fue del 75% (69 días).

En el caso de SO_2, la mayoría de los máximos estuvo por debajo de 76 ppb, si se compara con los dos años anteriores la diferencia entre es mayor, para 2018 y 2019 los máximos ≤ 75 ppb ocurrieron en el 79 y 78 % de los días, respectivamente; mientras que para 2020 la proporción incrementó al 96 % (que representan 85 días). Es importante mencionar que, en este año, la proporción de los máximos > 75 ppb es menor en los últimos 10 años, ya que solamente se registraron 4 días (4%), mientras que, en el resto de los años, estos valores se presentaron entre el 8 y el 33% (15 días) de los días del periodo analizado (**Figura 6.23**).

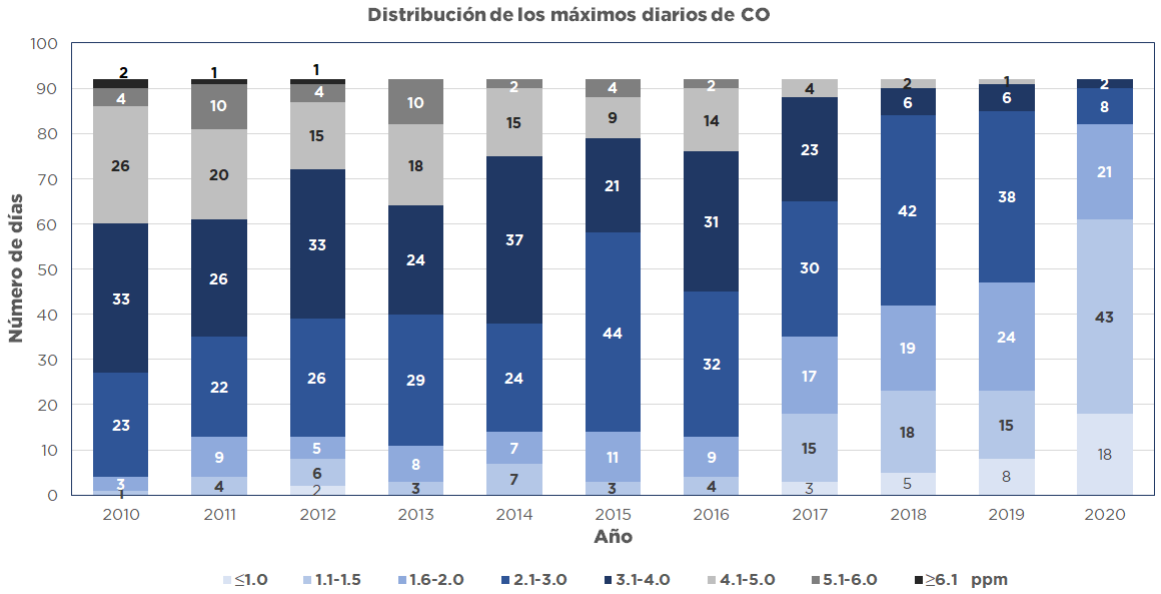


Figura 6.17. Distribución de máximos de CO del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020)

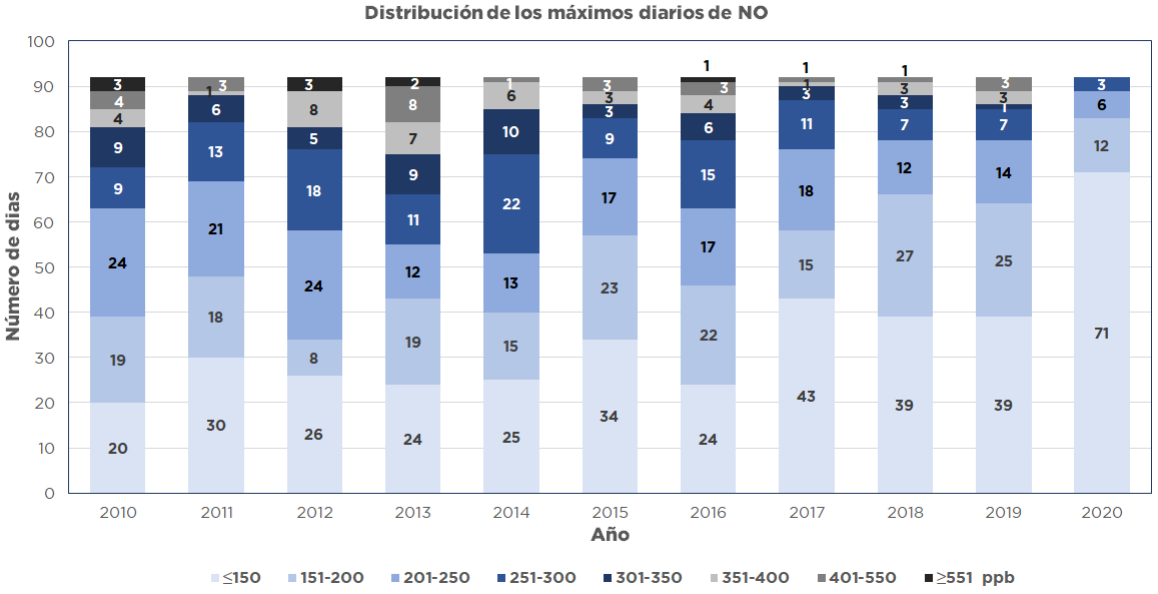


Figura 6.18. Distribución de máximos de NO del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020).

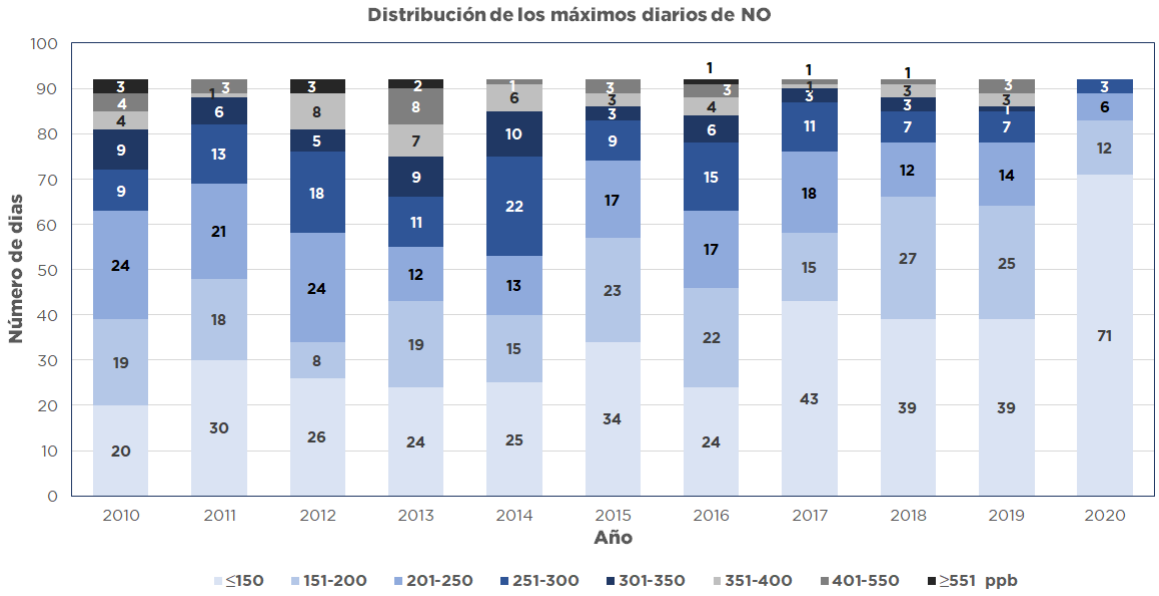


Figura 6.19. Distribución de máximos de NO_2 del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020)

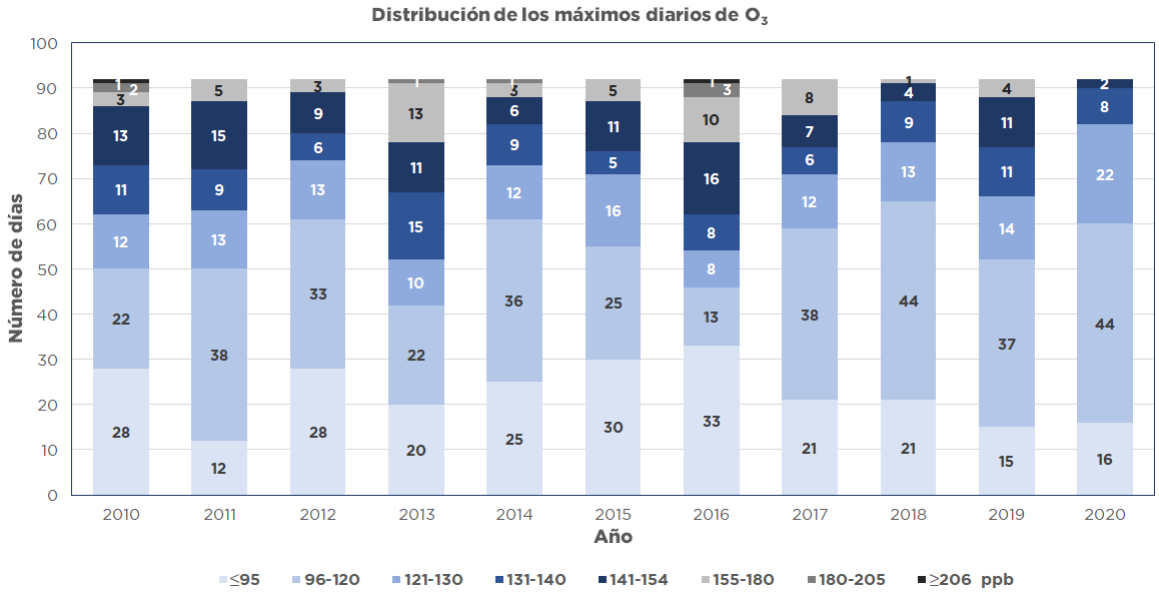


Figura 6.20. Distribución de máximos de O_3 del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020).

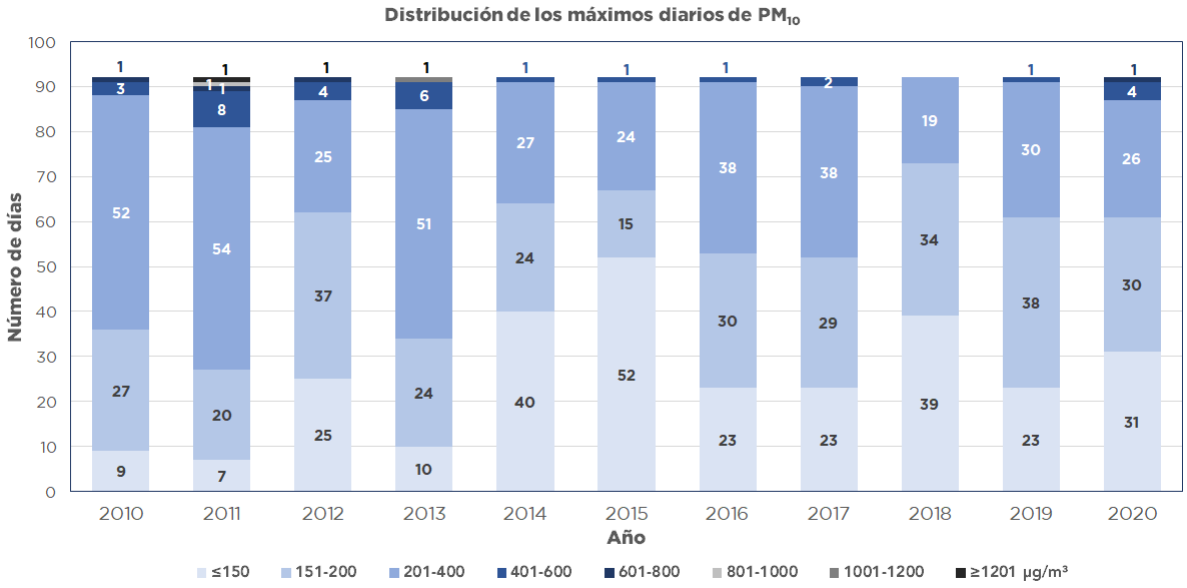


Figura 6.21. Distribución de máximos de PM_{10} del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020)

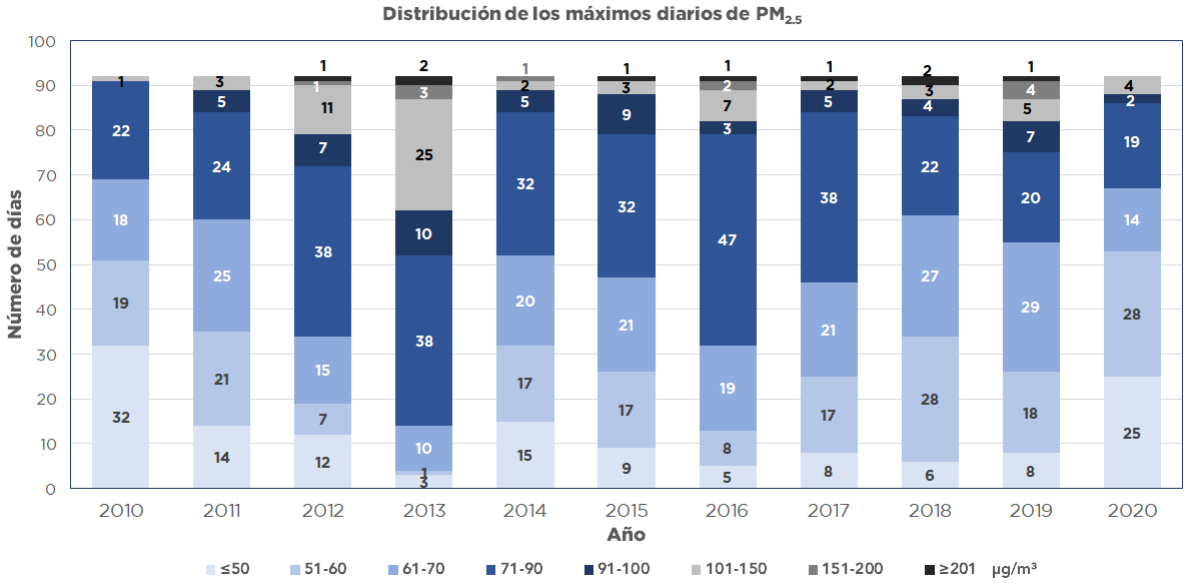


Figura 6.22. Distribución de máximos de $PM_{2.5}$ del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020)

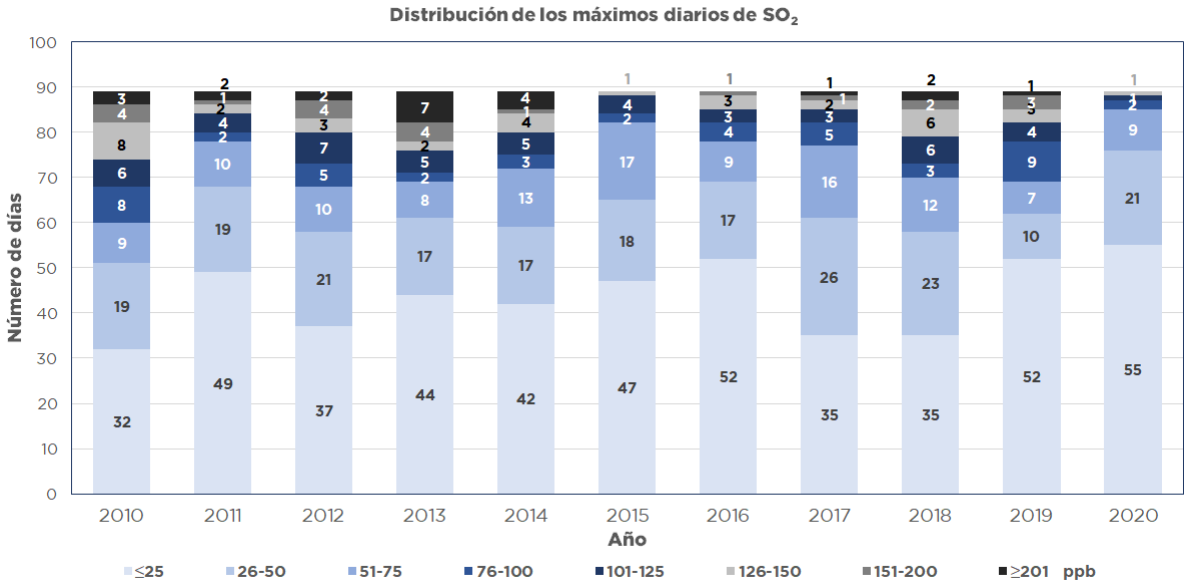


Figura 6.23. Distribución de máximos de SO_2 del 01 de marzo al 31 de mayo (2010 – 2020)

En general en todos los contaminantes la concentración de los valores máximos bajó incluso en el ozono, esto significa que la reducción de actividad debido a la pandemia redujo las concentraciones altas en todos los contaminantes primarios y secundarios, para los meses de marzo a abril del 2020.

ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN DÍAS SIMILARES

En esta sección se presenta el resultado del análisis en el cual se estimó la concentración de ozono **esperada** de acuerdo con su meteorología, con el desarrollo de modelos de aprendizaje automático no supervisado. Para determinar esto se analizaron y encontraron **días similares** en los **datos históricos**, de un periodo de 10 años (2010-2019)**,** en los que las variables meteorológicas fueron parecidas a las que se registraron en 2020 y, posteriormente, se comparó el máximo de ozono observado en el día similar, con la concentración registrada en los días de 2020.

MÉTODO

1. El procedimiento fue realizado para dos escenarios:

   - **Análisis diferenciado.** Se realizó el procedimiento con la diferenciación entre días laborales (L-V) y fines de semana.
   - **Análisis no diferenciado**. Se realizó el procedimiento sin hacer diferencia alguna entre los días laborales y fines de semana.

2. Se utilizaron las variables meteorológicas más importantes para la formación de ozono y se analizan de forma diaria con los siguientes indicadores:

   - Máximo de temperatura
   - Máximo de humedad relativa
   - Máximo presión atmosférica
   - Máximo radiación UV-B
   - Media de la **velocidad** del viento_h1 (07 - 14 h)
   - Media de la **dirección** del viento_h1 (07 - 14 h)
   - Media de la **velocidad** del viento_h2 (15 - 18 h)
   - Media de la **dirección** del viento_h2 (15 - 18 h)

3. Para las fechas del 2020, se obtienen los indicadores de las variables mencionadas del **día anterior inmediato,** esto se realizó con datos de la REDMET.

4. Para los datos históricos (2010-2019), se utilizaron las mismas variables meteorológicas y se calcularon sus indicadores diarios para los meses de **febrero a mayo**, en el horario de las 7:00 a las 18:59 horas.

5. Se aplicaron modelos de aprendizaje automático no supervisado para buscar los **días similares** (2010-2019) al **día anterior** en 2020.

La **Tabla 6.2** resume los métodos de agrupamiento utilizados y las medidas de proximidad o distancia.

Tabla 6.2. Métodos de agrupamiento y medidas de proximidad

Medidas de proximidad o distancia	Método de agrupamiento	Análisis jerárquico
Proximidad: Euclidean Maximum Manhattan Minkowski	Average Single Complete Ward	Hierarchical Clustering
Distancia: Covarianza Cor_1: 1- correlación Cor_2: (1- correlación) /2 Cor_3: 1- |correlación|		
Proximidad: Euclidean Maximum Manhattan Minkowski	El método de una jerarquía divisiva de Kaufman y Rousseeuw (1990) (Diana)	Divisive hierarchical clustering
Distancia: Covarianza Cor_1: 1- correlación Cor_2: (1- correlación) /2 Cor_3: 1- |correlación|		

6. Para encontrar el **día similar** al día anterior (2020), primero se ubica el conjunto donde el **día anterior** se agrupó y dentro de dicho conjunto, se calcula la distancia de los **días similares** obtenidos con el **día anterior**, finalmente se elige el **día similar** que presente la menor distancia.

RESULTADOS

En los dos escenarios analizados se estimó un alto número de eventos de contingencia que se pudieron presentar por condiciones meteorológicas similares a los eventos pasados de contingencias atmosféricas. A continuación, se describen los resultados de cada escenario.

Análisis diferenciado

En los resultados del caso diferenciado, donde los **días laborales del 2020** se relacionaron y agruparon con los **días laborales similares** en el periodo del 2010 al 2019, así como los días que corresponden al **fin de semana**.

Con esta agrupación de días, se estimó que, con base en las condiciones meteorológicas registradas en 2020, en **15 días** se hubieran superado 154 ppb y activado la Fase I (FI) de contingencia atmosférica por ozono (**Tabla 6.3**).

En la comparación de los máximos del 2020 y los observados en días similares (**Figura 6.24**) se puede notar que, del 23 de marzo al 31 de mayo (Fase 1 y 3 de contingencia sanitaria), destacan varios días con concentración de ozono superior a 154 ppb y que pudieron presentarse debido a las condiciones meteorológicas. A finales de marzo, se determinaron 2 días consecutivos con máximos de FI, mientras que, en abril se registraron 9 días y esto se observó con mayor frecuencia en el periodo del 8 al 24 de abril, donde las condiciones meteorológicas fueron adversas y podrían ocasionar eventos de contingencia consecutivos, como en el caso del 16-17 y 21-22 de abril, con valores estimados de hasta 192 ppb. En mayo, del 17 al 23, se determinaron 4 episodios, de los cuales 2 son días consecutivos, 22 y 23 de mayo.

Tabla 6.3. Días similares y su concentración de O_3 durante 2020 y 2010 – 2019. Análisis diferenciado

Fecha 2020	Máximo O_3 en 2020 (ppb)	Máximo O_3 en día similar (ppb)	Fecha similar
25/03/2020	142	156	17/04/2019
26/03/2020	101	185	23/05/2017
01/04/2020	121	158	08/04/2015
08/04/2020	128	192	20/05/2016
10/04/2020	101	156	17/04/2019
13/04/2020	121	156	17/04/2019
16/04/2020	126	158	16/04/2019
17/04/2020	139	166	22/05/2017
21/04/2020	136	192	20/05/2016
22/04/2020	132	192	20/05/2016
24/04/2020	120	156	17/04/2019
17/05/2020	99	169	14/05/2011
20/05/2020	128	166	21/05/2013
22/05/2020	129	156	17/04/2019
23/05/2020	122	159	30/03/2019

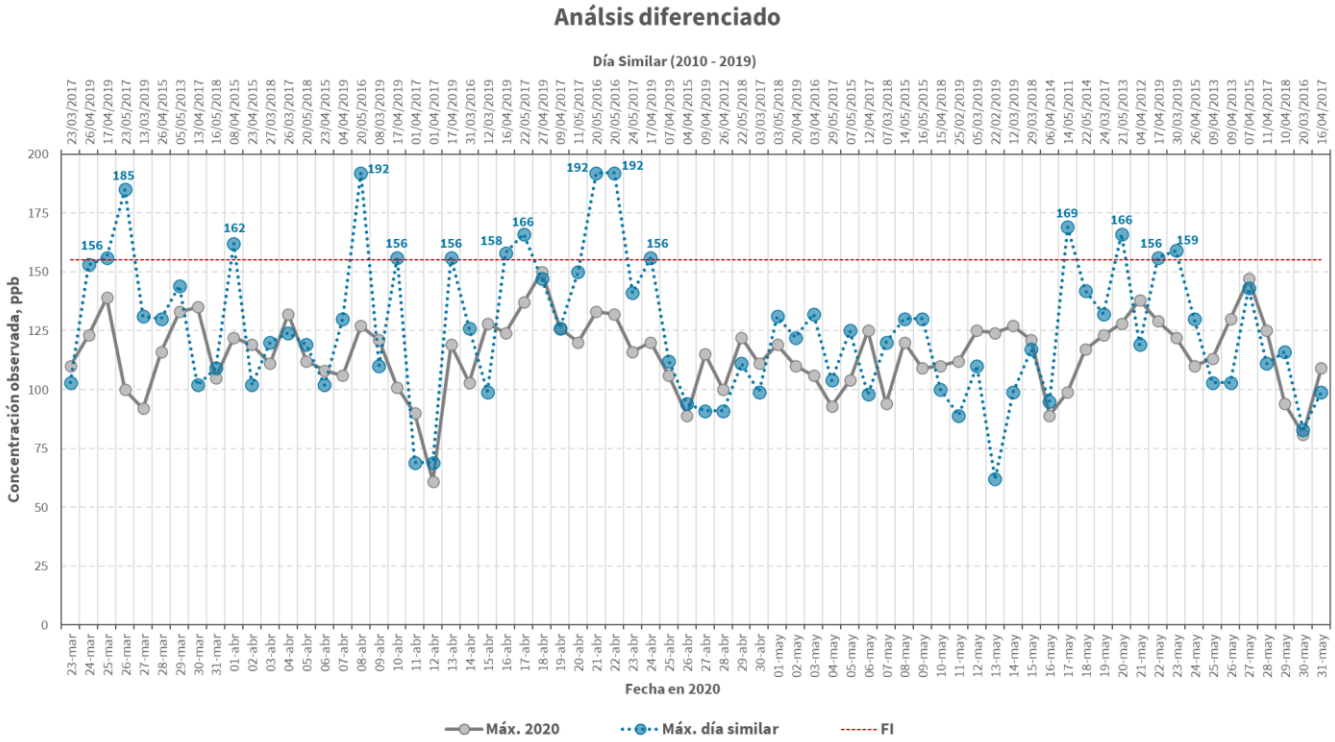


Figura 6.24. Serie de tiempo de los máximos de O_3 en 2020 y los observados en días similares (2010 – 2019), análisis diferenciado.

Análisis no diferenciado

En el análisis no diferenciado no se hizo ninguna distinción entre días laborales y fines de semana, es decir, se determinó el día similar solamente basándose en condiciones meteorológicas parecidas sin considerar a qué tipo de día corresponde ni sus características de emisiones. Los resultados estimaron que, con base en las condiciones meteorológicas registradas en 2020, había posibilidad de superar el valor de contingencia FI > 154 ppb en 8 días (**Tabla 6.4**, **Figura 6.25**).

Durante el 25 y 26 de marzo, se hubiera presentado un evento de dos días y del 21 al 23 de abril del 2020, el evento de contingencia hubiera durado tres días consecutivos y es importante mencionar que este último evento se relacionó con las características meteorológicas de las contingencias de mayo 2016, las cuales han sido de valores muy elevados (192 ppb) y de mayor duración en los últimos años.

Tabla 6.4. Días similares y su concentración de O_3 durante 2020 y 2010 – 2019. Análisis NO diferenciado

Fecha 2020	Máximo O_3 en 2020 (ppb)	Máximo O_3 en día similar (ppb)	Fecha similar
25/03/2020	142	156	17/04/2019
26/03/2020	101	156	17/04/2019
13/04/2020	121	158	16/04/2019
16/04/2020	126	158	16/04/2019
18/04/2020	152	184	27/04/2013
21/04/2020	136	192	20/05/2016
22/04/2020	132	192	20/05/2016
23/05/2020	122	159	30/03/2019

En conclusión, este análisis se utilizó para observar el comportamiento del O_3 en dos escenarios que se pudieron presentar debido a las condiciones meteorológicas, en el "mejor escenario" se estimó un mínimo de **8 días** con concentración horaria en FI de contingencia atmosférica (>154 ppb), que fue en el análisis no diferenciado.

Mientras que en el "peor escenario" (no diferenciado) se estimó que 15 días se tendría O_3 > 154 ppb. Esto sugiere que, si se hubieran tenido las emisiones normales, previas al COVID-19, la combinación de la meteorología y las emisiones habrían causado eventos de Fase I de contingencia atmosférica.

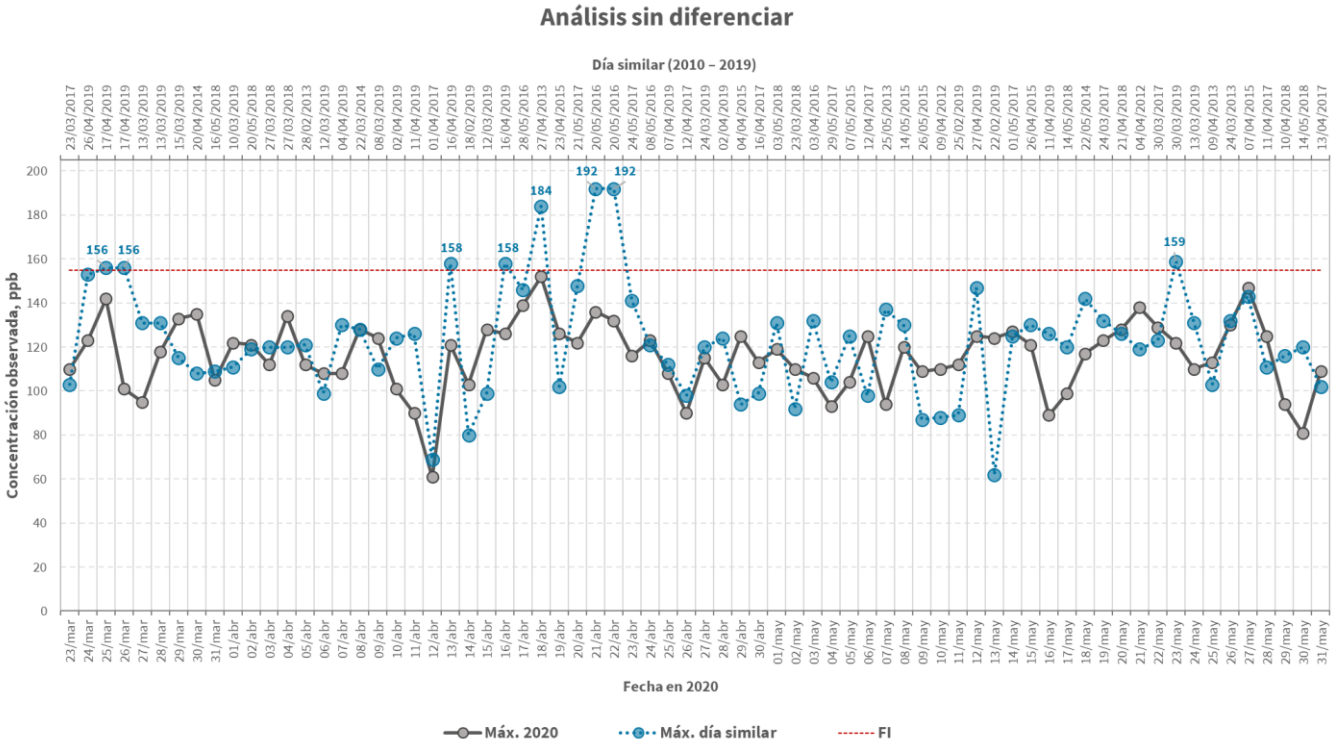


Figura 6.25. Serie de tiempo de los máximos de O_3 en 2020 y los observados en días similares (2010 – 2019), análisis no diferenciado.

Debido a las restricciones de actividades y movilidad por la pandemia, es claro que algunos contaminantes experimentaron reducciones significativas y otros tuvieron ligeros decrementos o hasta incrementos en los contaminantes secundarios, en todo el mundo se observaron cambios en la calidad del aire, sobre todo en las emisiones de los contaminantes primarios, se observó una gran heterogeneidad dependiendo de la región del mundo, debido a la complejidad de la atmósfera y de los factores que influyen en ella como son las emisiones regionales como la arena de Sahara, los incendios forestales, la meteorología, las emisiones domésticas, la quema en las cosechas, el uso de fertilizantes, etc. Y esto se vio reflejado en los estudios realizados por Forster et al (2020); Gaubert et al (2021); Sokhi et al (2020), Tang et al (2021); Vega et al (2021), entre otros. Sobre todo, es necesario entender como es la respuesta química de los contaminantes secundarios a los cambios en las emisiones bajo complejas condiciones meteorológicas, así como el cambio climático y el manejo de los factores socioeconómicos que pueden afectar la calidad del aire en el futuro. Sokhi et al (2020) menciona que la implicación de las políticas es muy importante, ya que en este estudio se demostró que las concentraciones de las $PM_{2.5}$ no se relacionan con las guías de la OMS en muchas partes del mundo, a pesar de la drástica reducción de la movilidad. Por lo que, es importante la revisión de la normatividad con metas más ambiciosas que sean específicas para las diferentes regiones del mundo y que sean adecuadas con lo que ocurre en cada una de ellas.

A partir de la pandemia Google recopilo datos de movilidad para ayudar a ver el impacto del COVID-19 (Google.com, 2020), los datos muestran la cantidad de visitas a ciertos lugares en la **Figura 6.26** se muestra la tendencia de movilidad de las diferentes clasificaciones que hicieron: 1) tiendas y ocio, 2) supermercados y farmacias, 3) parques, 4) estaciones de transporte, 5) lugar de trabajo, 6) zonas residenciales. En la **Tabla 6.5**, se muestra la clasificación detallada de cada categoría los lugares considerados para esa clasificación. El porcentaje que se muestra en cada gráfica es el promedio de abril y mayo de 2020, y el valor de cada punto es un valor de referencia que corresponde a las visitas a los diferentes lugares y este se compara contra el valor de referencia que es la mediana de ese día de la semana que corresponde al periodo de 5 semanas desde el 3 de enero al 6 de febrero de 2020, por lo que debe tomarse estos gráficos como una referencia. Se observan comportamientos interesantes, por ejemplo, el día en el que las categorías 1,2,4,5 y 6 presentan el mayor decremento o incremento de movilidad es el 10 de abril que fue el viernes santo, para la categoría parques el porcentaje mayor de decremento se presentó el día 10 de mayo relacionado con el día de las madres que cayó en domingo, día familiar en México. Otro comportamiento interesante es el del lugar de trabajo que presenta una cierta ondulación periódica y tiene que ver con el sábado y domingo en el que la movilidad a

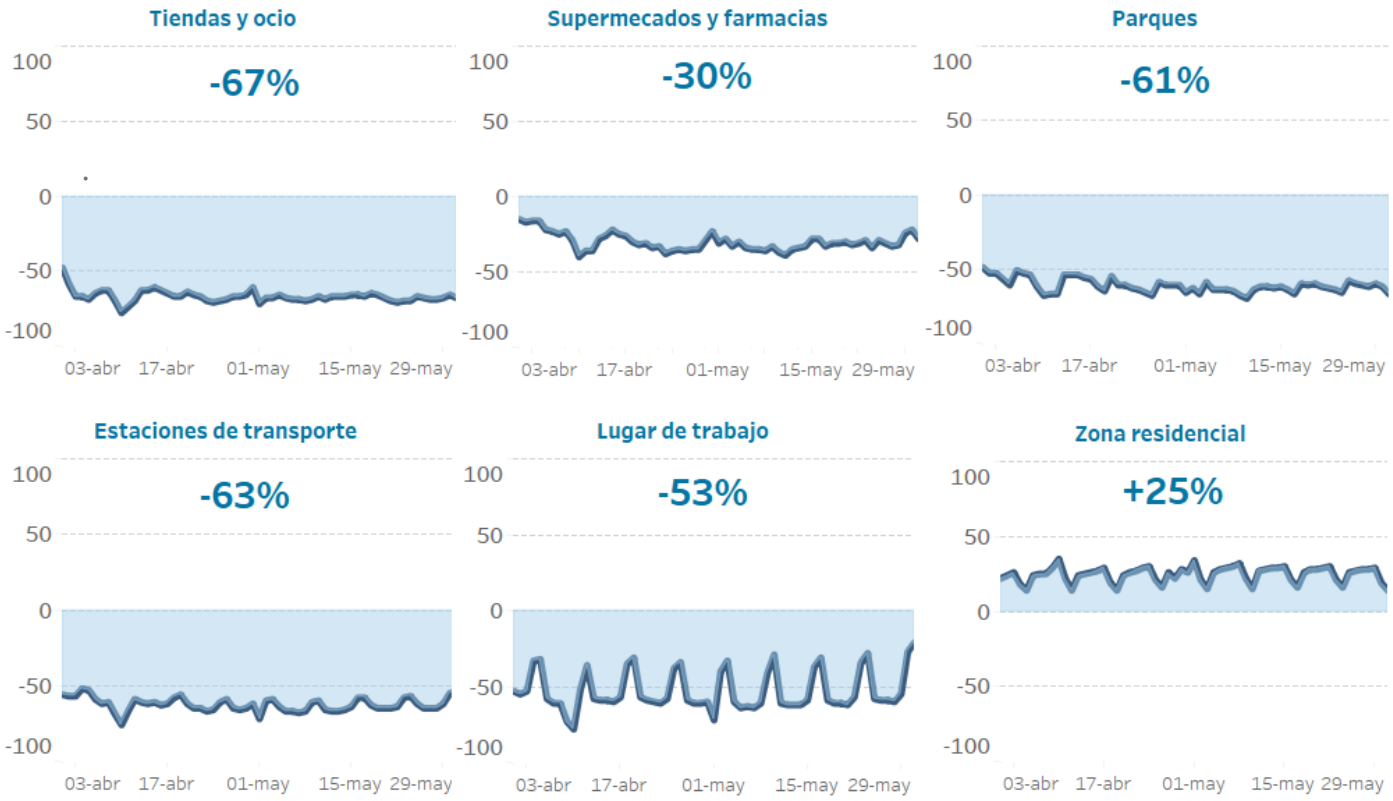


Figura 6.26. Serie de tiempo de la tendencia de movilidad en las diferentes categorías de lugares. El porcentaje representa el promedio de la reducción o incremento del periodo del 1 de abril al 31 de mayo del 2020, y se compara contra el valor de referencia que es del 3 de enero al 6 de febrero del 2020.

esos lugares de trabajo presentan una reducción del 34% comparado con el 61% de los días laborables. Ese comportamiento también lo presenta la zona residencial donde la movilidad de los fines de semana es 18% y en los días laborables (lunes a viernes) se incrementa al 27%. El incremento en la movilidad en las zonas residenciales debido a que la gente pasaba más tiempo en casa y cerca de su vecindario.

Tabla 6.5. Clasificación de los lugares de movilidad

Categoría	Lugares que incluye
Tiendas de ocio	Restaurantes, cafeterías, centros comerciales, parques temáticos, museos, bibliotecas y cines
Supermercados y farmacias	Supermercados, mercados, depósitos de alimentos, mercados de productores, tiendas de comida especializada, tiendas locales y farmacias
Parques	Parques nacionales, playas, puertos deportivos, parques para perros y jardines públicos
Estaciones de transporte	Estaciones de metro, autobús, paraderos de transporte público y tren
Lugar de trabajo	Lugares de trabajo como oficinas, comercios y servicios
Zona residencial	Lugares de residencia de la población

INFORME ANUAL
2020

Capítulo 7

ESPECIACIÓN QUÍMICA HORARIA DE AEROSOL ORGÁNICO

EFECTOS DE LAS RESTRICCIONES A LA MOVILIDAD POR LA COVID-19 EN LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS NO REGULADOS Y FUENTES ESPECÍFICAS DE CONTAMINACIÓN.

Resultados de la campaña EQAA3

Elaborado por: Amador-Muñoz Omar*, Hernández-López A. Enrique, García- Ibarra Alberto, Martínez-Domínguez Yadira. Grupo de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos, ICAyCC-UNAM, *oam@atmosfera.unam.mx

Introducción

En el 2020, la presencia del coronavirus SARS-CoV-2 causó una enfermedad conocida como COVID-19. Hasta junio del 2023, habían fallecido 6.9 millones de personas en el mundo por esta enfermedad (WHO, 2023) y en México 0.33 millones (CONAHCyT, 2023). El 11 de marzo del 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) calificó la propagación de COVID-19 como pandemia. Para prevenir su esparcimiento, se implementaron medidas para minimizar el contagio. La cronología de la contingencia sanitaria por COVID-19 en México se ilustra en la **Figura 6.1** del capítulo anterior. En México se implementó un sistema de semáforo epidemiológico (SSA, 2020) y la Ciudad de México pasó por primera vez al semáforo amarillo en mayo de 2021, las primeras clases presenciales fueron voluntarias y comenzaron en junio de 2021. Las restricciones enfocadas a la disminución de la propagación del virus originaron la reducción de la movilidad y, en consecuencia, el decremento de los contaminantes atmosféricos, lo que tuvo mejoras en la calidad del aire de la Ciudad de México y en otras ciudades a nivel mundial.

Si bien desde 1988 la calidad del aire en la Ciudad de México ha mejorado significativamente, con reducciones de **~90%** para CO y SO_2, así como del **~40 %** para óxidos de nitrógeno (NOx) (SEDEMA 2020), el periodo COVID-19 provocó decrementos significativos, sobre todo en abril y mayo para CO (**24 %**), NOx (**33 %**), NO (**46 %**), NO_2 (**27 %**), SO_2 (**24 %**), PM_{10} (**28 %**) y $PM_{2.5}$ (**29 %**), al comparar las concentraciones con los mismos meses de 2019. Sin embargo, se desconoce el impacto que tuvo este periodo sobre otros contaminantes atmosféricos que no están regulados. Es bien conocido que el aerosol atmosférico es una mezcla de partículas sólida y líquidas suspendidas en un gas (Baron y Willeke, 2001). A su fracción orgánica, se le conoce como aerosol orgánico. Si se emite directo a la atmósfera, se le llama aerosol orgánico primario (**AOP**), mientras que, si se forma en la atmósfera, es un aerosol orgánico secundario (**AOS**). Su constitución química es una mezcla multicomponente de diferentes familias como alcanos, ácidos grasos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), quinonas, alcoholes, fenoles, ésteres, cetonas, entre otros (Rogge et al., 1993a,b; Schauer et al., 2002; Vega et al., 2010; Amador-Muñoz et al., 2011, 2020a).

Este capítulo describe los compuestos orgánicos marcadores de algunas fuentes de emisión específicas que fueron medidos durante el confinamiento por COVID-19 en mayo del 2020. Se presenta su distribución horaria y el impacto en sus concentraciones en comparación con mayo del 2019.

Método

La tercera campaña de medición para la Especiación Química de Aerosoles Atmosféricos (**EQAA3**) se realizó del 2 al 23 de mayo de 2020, en la temporada de seca caliente. Este periodo se caracteriza por tener cielos despejados, vientos débiles, baja humedad y alta radiación solar, que promueve la formación de ozono y la reactividad en la atmósfera. También es común observar incendios por quema de biomasa en el territorio nacional.

El estudio se realizó en el suroeste de la Ciudad de México, en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM (ICAyCC-UNAM), ubicado a 2,280 metros sobre el nivel del mar (msnm), 19° 19'N, 99° 10' W. La colecta de $PM_{2.5}$ y el análisis continuo de los compuestos orgánicos se realizaron con el termodesorbedor de aerosoles – cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas (TAG-GC-MS). Las colectas fueron cada 50 min a 10 L min^{-1}. Las condiciones instrumentales fueron similares a las empleadas en las dos campañas previas (Amador-Muñoz et al., 2020b, 2022).

Brevemente, los compuestos orgánicos capturados en la celda de colecta se termodesorbieron a la trampa de enfoque y nuevamente a la columna cromatográfica en el GC, donde se llevó a cabo la separación para obtener los compuestos individuales que se transfirieron al MS para su detección y cuantificación. La determinación de la concentración de los compuestos se realizó por dilución isotópica utilizando estándares deuterados. Los detalles del método se pueden consultar en el capítulo 7 "Especiación química horaria de aerosoles atmosféricos" en el Informe Anual de Calidad del Aire 2019 (SEDEMA, 2022). Se utilizó el software Masshunter (Quantitative Analysis 10.1 de Agilent) para el análisis de las señales cromatográficas. El análisis estadístico se llevó a cabo con el paquete Statistica 13 (TIBCO Software, Inc.). Se utilizaron las pruebas estadísticas no paramétricas U de Mann Whitney (MW) y Kruskal Wallis (KW) para comparar las medianas, así como el análisis de componentes principales para confirmar las fuentes de emisión.

Resultados

Series de tiempo

La serie de tiempo de las $PM_{2.5}$ y de siete marcadores orgánicos de distintas fuentes de emisión, se observan en la **Figura 7.1a**. El reteno (1-metil-7-isopropil fenantreno) es un HAP marcador de la quema de biomasa especialmente de coníferas (Ramdahl,

1983), que se ha monitoreado en campañas anteriores. En función de su concentración, es posible clasificar los periodos de medición en subperiodos de no incendios y de incendios, como los descritos en mayo del 2019 (Amador-Muñoz et al., 2022), donde se determinó que los incendios contribuyeron a la contingencia ambiental extraordinaria por partículas y ozono (SEDEMA, 2022). En la actual campaña de medición, se observó el aumento en la mediana de la concentración del reteno del 13 al 23 de mayo del 2020 con respeto a la del 2 al 12 de mayo (MW, $p<0.05$). Por ello, el primer subperiodo se consideró de incendios, mientras que el segundo como no incendios.

El levoglucosan es una azúcar anhidra, marcador de quema de biomasa más general (Simoneit et al., 1999). En esta campaña la mediana de la concentración de levoglucosan no fue significativamente diferente entre el subperiodo de incendios y no incendios. Esto sugiere que la quema de biomasa de especies diferentes a las coníferas (por ejemplo, de tipo matorral); fue menos intensa que la quema de éstas últimas.

Los HAPs cancerígenos como benzo[*a*]antraceno (BaA); criseno (Cris); benzo[*b*]fluoranteno (BbF); benzo[*k*] fluoranteno (BkF); benzo[*j*] fluoranteno (BjF); y benzo[*a*]pireno (BaP) (IARC, 1983; 2010; 2012), se emiten principalmente por la quema incompleta de combustibles fósiles o no fósiles.

En zonas urbanas, sus emisiones principalmente provienen de la quema de gasolina por los vehículos (Amador-Muñoz et al., 2020a). La suma de los HAPs (**∑HAPs**) mostraron diferencias en las medianas de la concentración entre los subperiodos de incendios y no incendios, sugeridos por el reteno (MW, $p<0.05$), con mayores concentraciones en el primero (**Figura 7.1b**).

En esta tercera campaña se analizaron nueve ftalatos, sin embargo, únicamente el di-n-butil-ftalato (DBF) y el bis(2-etilhexil)-ftalato (DEHF) tuvieron suficiencia de datos (> 90 %). Estos compuestos se consideran modificadores endócrinos, ya que pueden imitar, bloquear o alterar la acción de las hormonas naturales en el cuerpo, con implicaciones adversas en la reproducción, desarrollo cognitivo y neurológico, trastornos metabólicos, disfunción del sistema inmunológico, entre otros (ATSDR, 2001, 2022; Biemann et al., 2021). El DBF es un compuesto químico que se utiliza como agente plastificante, se adiciona a plásticos rígidos para mejorar la adherencia, la flexibilidad y la durabilidad. Sus usos más comunes son en plásticos de cloruro de polivinilo (PVC) y lacas de nitrocelulosa. Se encuentra en tuberías, revestimientos de suelos y madera, juguetes, recubrimientos de cables, adhesivos, selladores, barnices, pinturas, entre otros (ATSDR, 2001). El DEHF también se usa como plastificante en diversos productos, en especial para recubrir material médico, muebles, cosméticos y productos de uso personal (Rowdhwal y Chen, 2018).

Debido a que los ftalatos se adhieren al plástico por medio de una unión química débil (enlace covalente), durante el proceso, se liberan al ambiente por su uso repetido, al calentar o lavar los productos que lo contienen. En el caso del DBF, su presencia en la atmósfera también se debe a la degradación de otros ftalatos. La regulación y restricción de los ftalatos varía en diferentes países y regiones. Por ejemplo, en la Unión Europea (UE) está prohibido su uso en productos de consumo como textiles, juguetes, plásticos para empacar alimentos, entre otros (ECHA, 2023). Las medianas de la concentración de DBF y DEHF durante la campaña de muestreo (**Figura 7.1b**) no fueron diferentes entre los subgrupos de incendios y no incendios (MW, $p>0.05$).

Los oxi-HAPs, también llamados quinonas, están presentes tanto en la fase gaseosa como en la fase particulada del aerosol atmosférico. Estos compuestos se generan principalmente como subproductos de la quema incompleta de combustibles fósiles o bien, se forman fotoquímicamente a partir de sus HAPs precursores, mediante reacciones de fotooxidación en la atmósfera (Pietrogrande et al., 2022).

La información acerca de los efectos en salud de las quinonas es escasa. Sin embargo, en años recientes, se ha incrementado su estudio debido a que es probable que presenten mayor mutagenicidad y carcinogenicidad que sus precursores (Pietrogrande et al., 2022).

Durante la campaña EAAQ3, se monitorearon cuatro quinonas. Únicamente la antraquinona (Antrona) y la benzantrona (Bzona) mostraron suficiencia de observaciones (>85 %). Esta última se encuentra clasificada por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) en el **Grupo 2B**: "posible carcinogénica para los seres humanos" (IARC, 2008). La comparación de las medianas de la antraquinona no mostró diferencias entre los subperiodos de incendios y no incendios. Caso contrario se observó para la benzantrona, donde hubo diferencias (MW, $p<0.05$), con mayores concentraciones en el subperiodo de incendios.

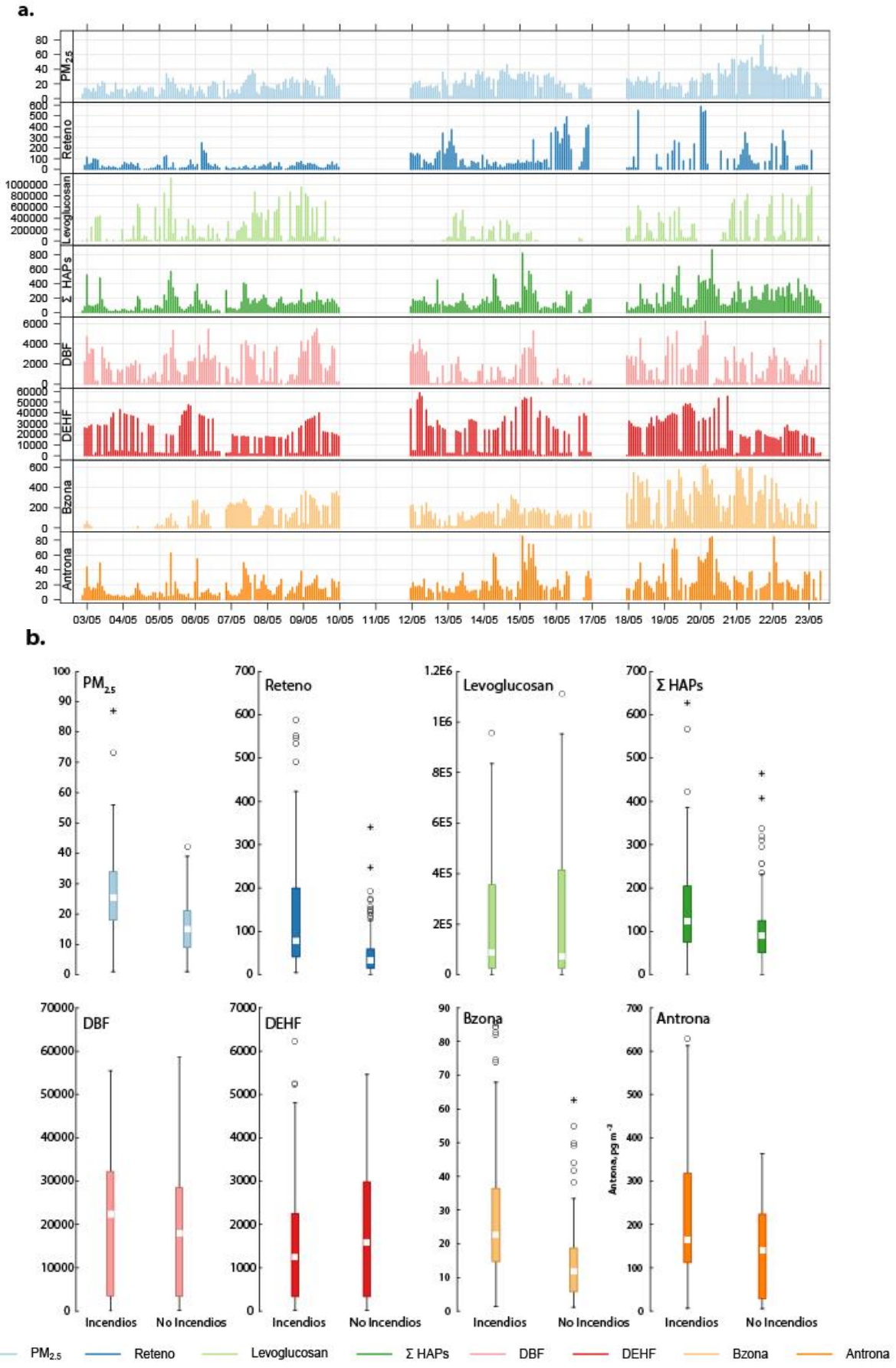


Figura 7.1. a) Series de tiempo de $PM_{2.5}$ (µg m^{-3}) y marcadores orgánicos (*pg* m^{-3}) determinados con resolución horaria del 2 al 23 de mayo de 2023. Reteno*, levoglucosan, ΣHAPs* (B*a*A, Cris, B*b*F, B*k*F, B*j*F, B*a*P), *di-n-butil-ftalato (DBF), bis(2-etilhexil)-ftalato (DEHF), benzantrona** (*Bzona*) y *antraquinona* (*Antrona*). **b)** Comparación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y marcadores orgánicos entre los subperiodos de incendios y no incendios, * p<0.05. Cuadros internos – medianas, cajas – 25 % -75 %, barras – min – max, círculos – "outliers", asteriscos – valores extremos.

Distribución horaria, origen y fuentes de emisión

La distribución horaria de las $PM_{2.5}$ y los compuestos orgánicos se muestra en la **Figura 7.2**. Se observaron tres comportamientos. El primero con máximos en la noche, el segundo bimodal con máximos por la mañana y en la tarde-noche y el tercero, asintótico.

En el primer grupo se encontró el reteno, con concentraciones máximas durante la madrugada y primeras horas de la mañana (KW, $p<0.05$), cuando los vientos provinieron del sur y descendieron de la montaña al valle (catabáticos), contrario a los vientos en el periodo diurno, donde se originaron del norte (vientos valle-montaña o anabáticos) (Salcedo et al., 2018).

En el segundo grupo se encontraron la ΣHAPs, el DEHF y la benzantrona, con concentraciones máximas por la mañana entre 07:00 y 11:00 h y por la noche entre 21:00 y 2:00 h (KW, $p<0.05$). Este comportamiento corresponde al patrón de circulación vehicular, pero en este caso desplazado 1 a 2 horas con respecto al observado en campañas previas (Amador-Muñoz et al., 2020b, 2022). Este desplazamiento horario pudo deberse a las medidas de restricción por COVID-19, que afectó los tiempos de movilidad de las personas para el desarrollo de sus actividades.

En el tercer grupo, se encontraron las $PM_{2.5}$, el levoglucosan, el DBF y la antraquinona, con un comportamiento asintótico durante el día (KW, $p>0.05$), sugiriendo aportes constantes al sitio de muestreo, probablemente emitidas por fuentes fijas o de área.

La **Figura 7.3** ilustra las gráficas polares bivariadas diurnas y nocturnas. Las $PM_{2.5}$ mostraron mayor concentración durante el día, provenientes del sur-suroeste y norte-noreste, con vientos entre 4 y 6 m/s, originadas de fuentes lejanas al sitio de medición. En el periodo nocturno, las concentraciones fueron menores y originadas por fuentes más cercanas al sitio de colecta. Es decir, las $PM_{2.5}$ fueron principalmente transportadas al sitio de observación. Esto coincide con mediciones previas (Amador-Muñoz et al., 2011).

El comportamiento en los marcadores de quema de biomasa fue diferente entre ellos. Las mayores concentraciones de reteno ocurrieron en la noche, con viento débil del oeste (3 a 4 m/s). Mientras que las mayores concentraciones de levoglucosan ocurrieron durante el día, también con viento del oeste (4 a 5 m/s). Los resultados mostraron que la quema de biomasa está presente todo el tiempo, y que el aporte de $PM_{2.5}$ generadas por esta fuente proviene de distintos tipos de especies vegetales.

La ΣHAPs, la benzantrona y el DEHF, mostraron similar comportamiento en el periodo diurno. Sus mayores concentraciones se observaron localmente, sugiriendo que se emitieron alrededor del sitio de muestreo, siendo su principal fuente la vehicular. Estos resultados coinciden con los descritos en campañas previas. Durante el periodo nocturno, la ΣHAPs y la benzantrona se comportaron de forma similar que el reteno, probablemente por su incorporación a las $PM_{2.5}$ provenientes de la quema de biomasa en los vientos catabáticos. Esto fue posible observarlo por las bajas concentraciones medidas de ΣHAPs y benzantrona.

El DEHF mostró diferente comportamiento nocturno que el reteno, con mayor dispersión espacial. Originado del norte y del sureste con vientos de hasta 4-5 m/s. El DBF es el otro ftalato que también mostró alta dispersión espacial. Durante el día, las máximas concentraciones se observaron del noreste con vientos superiores a 5 m/s, sugiriendo que su origen proviene de fuentes más lejanas al sitio, mientras que, en la noche, sus máximos se originaron del oeste en las cercanías al sitio de medición.

El origen del DBF y su comportamiento asintótico en la distribución horaria sugiere que su emisión se debe a fuentes fijas localizadas en el norte de la ciudad. De hecho, esa es la zona donde se concentra el mayor número de industrias relacionadas con la elaboración de productos del plástico y derivados (SEDEMA, 2021). La antraquinona mostró un origen diferente al resto de los marcadores orgánicos. Las máximas concentraciones se originaron del sureste al sitio de colecta durante el periodo nocturno y de fuentes no tan cercanas. Sugiriendo transporte al sitio de observación.

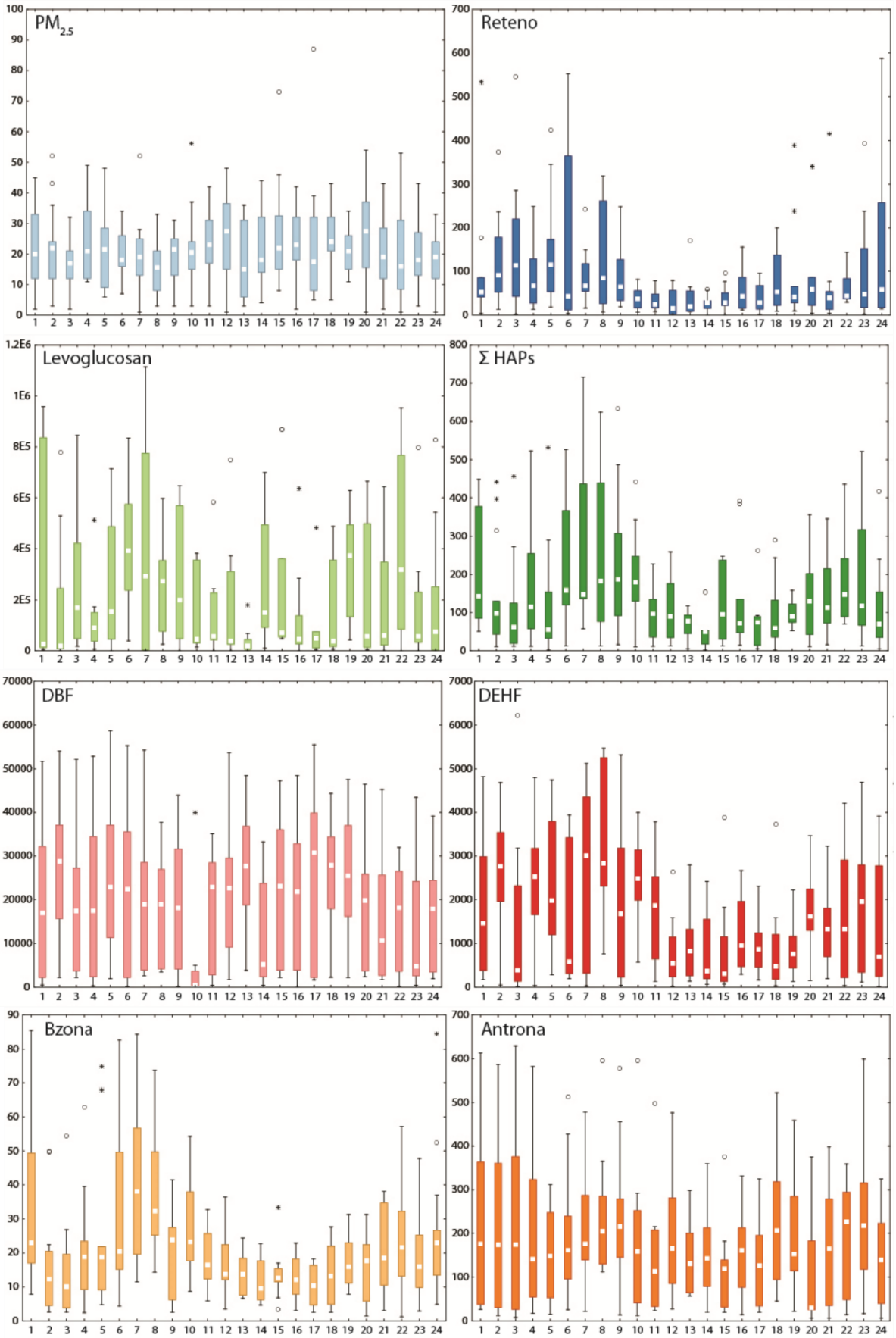


Figura 7.2. Variabilidad horaria de $PM_{2.5}$ *(µg m^{-3})* y marcadores orgánicos de distintas fuentes de emisión *(pg m^{-3})*. Cuadros internos – medianas, cajas – 25 % -75 %, barras – min – max, círculos – "outliers", asteriscos – valores extremos. Las horas consideraron el comienzo de la toma de la muestra. Si la colecta comenzaba antes de los 30 min de cada hora, se asignó la hora inmediata anterior, en caso contrario, la posterior.

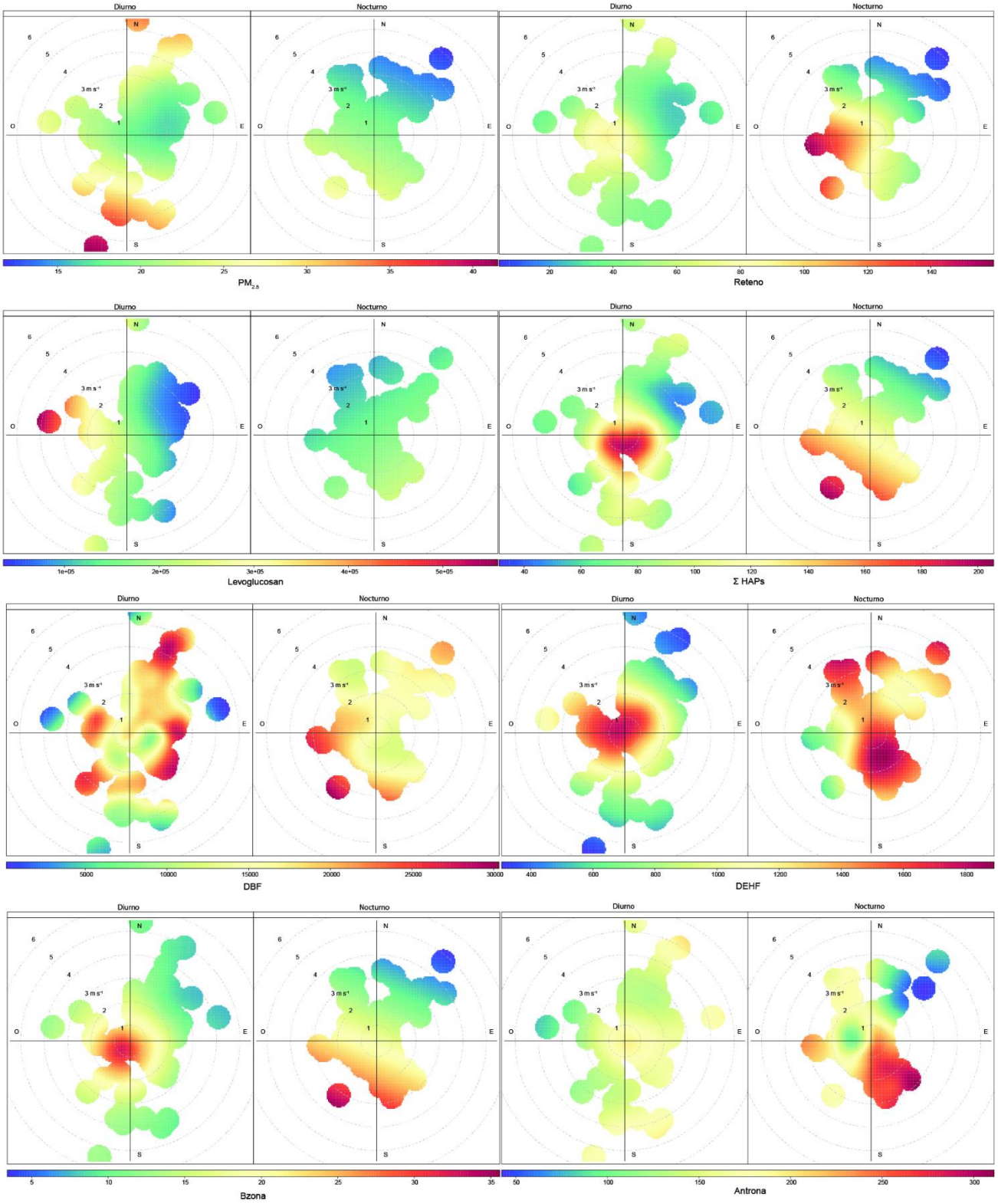


Figura 7.3. Gráficas bivariadas de la concentración promedio de $PM_{2.5}$ *(µg m^{-3})* y de compuestos orgánicos marcadores de distintas fuentes de emisión *(pg m^{-3})*.

La **Tabla 7.1** describe los resultados del análisis de componentes principales (ACP). Se incluyeron contaminantes criterio. Tres componentes explicaron el 58 % de la varianza total. La ΣHAPs, el DEHF, la benzofenona y los óxidos de nitrógeno se agruparon en el componente 1 (CP1), con la mayor varianza explicada (32 %). Las $PM_{2.5}$ y la antraquinona se agruparon en el componente 2 (CP2, 14 % de varianza), mientras que el DBF en el componente 3 con 12 % de varianza explicada.

Considerando la distribución horaria y las gráficas polares bivariadas, el CP1 está asociado con el tráfico vehicular, el CP2 con el transporte de compuestos al sitio de medición y el CP3 con fuentes industriales. El CP2 también incluyó al O_3; sin embargo, su carga no fue significativa. El reteno no se asoció con ningún componente. Esto es consistente, ya que su origen fue la quema de biomasa. El ACP solo generó 3 componentes.

Tabla 7.1. Análisis de componentes principales calculado con variables estandarizadas y rotación varimax. Se muestra la matriz de cargas de los marcadores orgánicos en $PM_{2.5}$ y contaminantes criterio.

Contaminantes	CP1	CP2	CP3
Reteno	0.446	0.134	-0.021
Σ HAP	**0.777**	0.016	-0.052
DBF	0.001	-0.172	**0.930**
DEHF	**0.594**	-0.198	0.319
Bzona	**0.834**	0.039	0.046
Antrona	0.379	**0.599**	0.164
O_3	-0.566	0.440	0.205
$PM_{2.5}$	0.213	**0.807**	0.024
NOx	**0.698**	-0.145	-0.168
Eigenvalores	2.85	1.31	1.07
Varianza explicada (%)	32	14	12
Varianza acumulada (%)	32	46	58

Levoglucosan no fue incluido porque no cumplía el 80 % observaciones requeridas para este análisis. *∑HAPs (BaA, Cris, BbF, BkF, BjF, BaP),* di-n-butil-ftalato (DBF), bis(2-etilhexil)-ftalato (DEHF), *benzantrona (Bzona) y antraquinona (Antrona).*

Efecto de las restricciones a la movilidad por COVID-19 en la concentración de contaminantes orgánicos no regulados

La **Figura 7.4** muestra la comparación de medianas de los contaminantes orgánicos en 2019 (1 – 9 mayo y 17 mayo – 10 junio) con respecto a las obtenidas en 2020 (02 – 12 mayo). Ambos subperiodos son de no incendios y pertenecen a la temporada seca caliente. Los porcentajes de reducción se presentan en la **Tabla 7.2.** En 2020, la concentración de los marcadores de tráfico vehicular como la ΣHAPs, la benzantrona y el DEFH redujeron 68 %, 49 % y 36 %, respectivamente (MW, $p<0.05$). La concentración del DBF, marcador de fuentes industriales del plástico, disminuyó 52 % (MW, $p<0.05$), y la concentración de antraquinona (transporte) redujo 20 % (MW, $p<0.05$).

Estos resultados concuerdan con las reducciones reportadas para la mayoría de los contaminantes criterio en México y en otras partes del mundo. Por ejemplo, para NO_2 (Sidney -12 %, México -20 %, Delhi -60 %), PM_{10} (Los Ángeles 0.0 %, Ciudad de México -13 %, Delhi -45.9 %), $PM_{2.5}$ (Roma +8.3 %, Ciudad de México -19 %, Johannesburgo -31.3 %) y O_3 (Wuhan +54.2 %, Estambul -42.9 %) (Fu et al., 2020). Estas reducciones fueron el resultado del confinamiento debido a la restricción de la movilidad de las personas. La pandemia por COVID-19 trajo consigo mejor calidad del aire, a costa de millones de vidas perdidas.

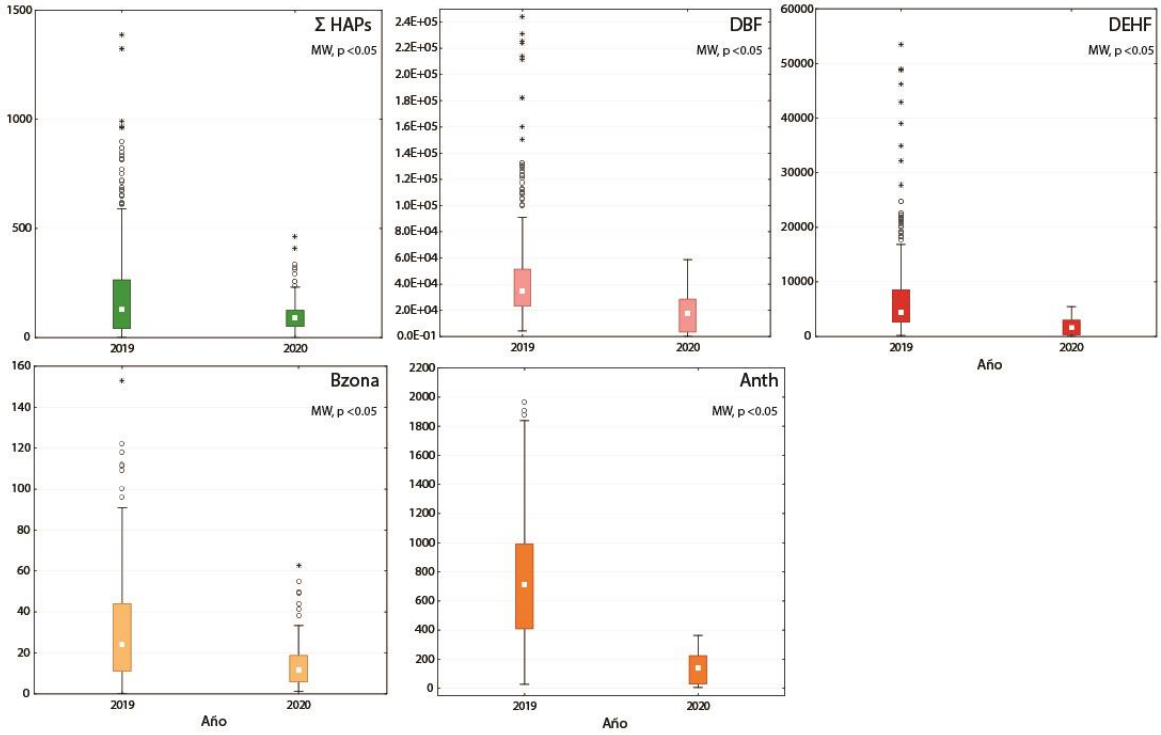


Figura 7.4. Comparación de las concentraciones de contaminantes orgánicos no regulados en 2020 (COVID-19), con respecto a 2019. Medianas -cuadros internos, 25 % -75 % - cajas, min. – max. -barras, círculos, asteriscos – valores extremos.

Tabla 7.2. Comparación de las concentraciones de contaminantes orgánicos no regulados en 2020 (COVID-19), con respecto a 2019. Reducciones calculadas con las medianas.

	2019			2020			
Compuesto	**Media pg m^{-3}**	**Mediana pg m^{-3}**	**Desv.est pg m^{-3}**	**Media pg m^{-3}**	**Mediana pg m^{-3}**	**Desv.est pg m^{-3}**	**Reducción %**
Σ HAPs	244	135	295	106	91	80	**68**
DBF	46,843	34,569	45,658	18,895	17,984	14,977	**52**
DEHF	9,058	4,429	18,524	1,836	1,587	1,500	**36**
Antrona	740	713	392	144	140	104	**20**
Bzona	32	24	27	14	12	11	**49**

INFORME ANUAL
2020

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Amador, M., O., Villalobos, P., R., Miranda, J., Vera, L., (2011). *Organic compounds of $PM_{2.5}$ in Mexico Valley spatial and temporal patterns, behavior and sources*. Sc. of the Total Env. 409. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971001257X

Amador,-M., O., Martínez, D.Y.M., Gómez, A. P. (2020). *Current situation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in $PM_{2.5}$ in a receptor site in Mexico City and estimation of carcinogenic PAH by combining non-real-time and real-time measurement techniques*. Sc. of the Total Env. 703. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719345176

Amador,-M.,O., Martínez, D.Y.M., Reyes,G.J.A., Franco, H.A. (2020). *Especiación química horaria de aerosoles orgánicos atmosféricos. Caso de estudio: Análisis de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en $PM_{2.5}$. Resultados de la campaña EQAA1, 2018. Cap. 6.* Secretaría del Medio Ambiente CDMX, Informe 2018. Dirección General de Calidad del Aire. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2018.pdf

Amador,-M.O., Martínez,D.Y. M., García,I.A., Lira,G.E., Hernández,L.A.-E. (2022). *Compuestos orgánicos marcadores de la quema de biomasa. resultados de la campaña EQAA2*. Cap. 7. Secretaría del Medio Ambiente CDMX, Informe 2019. Dirección General de Calidad del Aire. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2019.pdf

American Lung Association. (2022). *Nitrogen dioxide*. (Consultado 21 febrero 2023). https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/nitrogen-dioxide

American Lung Association. (2023). *Sulfur dioxide*. (Consultado en febrero de 2023). https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/sulfur-dioxide

Anenberg, S-C., Mohegh, A., Goldberg, D. L., Kerr, G.H., Brauer, M., Burkart, K., Hystad, P., Larkin, A., Wozniak, S., Lamsal, L. (2022). *Long term trends in urban NO2 concentrations and associated pediatric asthma incidence: estimates from global datasets*. The Lancet, Planetary Health 6(1). https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00255-2

Armas, F., V., D'Angiulli, A. (2022). *Neuroinflammation and neurodegeneration of the central nervous system from air pollutants.* Review Toxics 10 (11). https://doi.org/10.3390/toxics10110666

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2001). *Toxicological Profile for Di-n-butyl Phthalate (DBF)*. U.S. Department of Health and Human Services. https://link.springer.com/article/10.5487/TR.2011.27.4.191

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2022). Toxicological Profile for Di (2-Ethylhexyl) Phthalate (DEHP). U.S. Department of Health and Human Services. https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.9059

Australia Gov. (s/f). *Sulfur dioxide in the air*. Consultado en diciembre 2022. https://www.epa.vic.gov.au/for-community/environmental-information/air-quality/sulfur-dioxide-in-the-air

Ávila, R.D., 2018. Influencia de las condiciones meteorológicas en el depósito atmosférico húmedo en la zona metropolitana de la Ciudad de México. (2018). Programa de maestría y doctorado en Ingeniería. Ingeniería Ambiental.

UNAM, México, pp. 1–132. http://132.248.9.195/ptd2018/septiembre/0780034/Index.html

Barnett, A. G., Williams, G. M., Schwartz, J., Best, T. L., Neller, A. H., Petroeschevsky, A. L., Simpson, R. W. (2006). *The effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular disease in elderly people in Australian and New Zealand cities*. Environmental health perspectives, 114(7). https://doi.org/10.1289/ehp.8674

Baron P. A., Willeke K. (2001). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. (2001). John Wiley & Sons. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ETvXooNW4-EC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Aerosol+measurement:+principles,+techniques,+and+applications.+&ots=Go5wBHOUPs&sig=MEa1o3k9AoQqh9GU3xr6WS7pqmE#v=onepage&q=Aerosol%20measurement%3A%20principles%2C%20techniques%2C%20and%20applications.&f=false

Beelen R., Hoek G., Van der Brandt P.A., Goldbohm R.A., Fischer P., Schouten L.J., Armstrong B., Brunekreef B. (2008). *Long term exposure to traffic-related air pollution and lung cancer risk*. Epidemiology 19. https://www.jstor.org/stable/25662617

Bell, M. L., Ebisu, K., Peng, R. D., Walker, J., Samet, J. M., Zeger, S. L., Dominici, F. (2008). *Seasonal and regional short-term effects of fine particles on hospital admissions in 202 US counties, 1999-2005*. American Journal of Epidemiology, 168(11). https://doi.org/10.1093/aje/kwn252

Biemann R., Blüher M., Isermann B. (2021). *Exposure to endocrine-disrupting compounds such as phthalates and bisphenol A is associated with an increased risk for obesity*. Best Practice & Research Clinical Endocrinology & Metabolism, 35(5). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1521690X21000634

Briceño, G. (2018). *Humedad relativa*. Euston96. https://www.euston96.com/humedad-relativa/

Bu, X., Xie, Z., Liu, J., Wei, L., Wang, X., Chen, M., Ren, H. (2021). *Global PM2.5-attributable health burden from 1990 to 2017: Estimates from the Global Burden of disease study 2017*. Environmental Research, 197(111123). https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111123

California Air Resources Board (CARB). (2023). *Sulfur dioxide & Health*. Conjsultado en enero de 2023) https://ww2.arb.ca.gov/resources/sulfur-dioxide-and-health

California Air Resources Board (CARB). (2023). *Carbon monoxide and health*. Consultado en febrero de 2023. https://ww2.arb.ca.gov/resources/carbon-monoxide-and-health

Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM (CCA). (2017). *Análisis del estado del arte sobre el depósito atmosférico en México y su relación con el cambio climático.* (Consultado en diciembre de 2022). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/410254/INFORME_FINAL_EADAM_V3_INECC.pdf

Chen, Z., Liu, N., Tang, H., Gao, X., Zhang, Y., Kan, H., Deng, F., Zhao, B., Zeng, X., Sun, Y., Qian, H., Liu, W., Mo, J., Zheng, X., Huang, C., Sun, C., Zhao, Z. (2022). *Health effects of exposure to sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ozone, and carbon monoxide between 1980 and 2019*: A systematic review and meta-analysis. Indoor Air, 32(11). https://doi.org/10.1111/ina.13170

Collart, P., Dubourg, D., Levêque, A., Sierra, N. B., Coppieters, Y. (2018). *Short-term effects of*

nitrogen dioxide on hospital admissions for cardiovascular disease in Wallonia, Belgium. International Journal of Cardiology 255. https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.12.058

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). *Estado del clima en México durante 2020 y perspectivas para 2021*. Consultado en diciembre 2022. https://www.gob.mx/conagua/prensa/estadi-del-clima-en-mexico-durante-2020-y-perspectivas-para-2021

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., Schwartz, J. D. (2017). *Air pollution and mortality in the medicare population*. The New England Journal of Medicine, 376(26). https://doi.org/10.1056/nejmoa1702747

European Chemical Agency Phthalates (ECHA). (2023). (Rev. Junio 2023) https://echa.europa.eu/hot-topics/phthalates revisado el 28/06/2023 https://datos.covid-19.conacyt.mx/

Eckel, S. P., Cockburn, M., Shu, Y.-H., Deng, H., Lurmann, F. W., Liu, L., Gilliland, F. D. (2016). *Air pollution affects lung cancer survival*. Thorax, 71(10). https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2015-207927

Environmental Protection Agency (EPA-USA). (2008). *Evaluación científica integrada para óxidos de azufre*. EPA-Criterios de Salud. EPA/600/R-08-/047F.

EPA Victoria Australia. *Sulfur dioxide in the air*. (Consultado en enero 2023). https://www.epa.vic.gov.au/for-community/environmental-information/air-quality/sulfur-dioxide-in-the-air

Eroski Consumer, España. (2005). *Óxidos de nitrógeno*. Consumer |; Eroski Consumer. https://www.consumer.es/medio-ambiente/oxidos-de-nitrogeno.html

Eum, K.-D., Kazemiparkouhi, F., Wang, B., Manjourides, J., Pun, V., Pavlu, V., Suh, H. (2019). *Long-term NO2 exposures and cause-specific mortality in American older adults*. Environment International, 124. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.060

Ferreira, A. P. S., Ramos, J. M. O., Gamaro, G. D., Gioda, A., Gioda, C. R., & Souza, I. C. C. (2022). *Experimental rodent models exposed to fine particulate matter (PM2.5) highlighting the injuries in the central nervous system: A systematic review*. Atmospheric Pollution Research, 13(5). https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101407

Forster, P.M., Forster, H.I., Evans, M.J. et al. . (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. Nat. Clim. Chang. 10, 971. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0904-z

Foy, B., Brune, W.H., Schauer, J.J., 2020. *Changes in ozone photochemical regime in Fresno, California from 1994 to 2018 deduced from changes in the weekend.* Environ. Pollut. 263. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114380

Fu, F., Purvis,R.K.., Williams B. (2020*). Impact of the COVID-19 pandemic lockdown on air pollution in 20 major cities around the world*. Atmosphere, 11. https://www.mdpi.com/2073-4433/11/11/1189

Gabriela, B. V. (2018). *Humedad relativa*. Euston96. (Consultado en enero 2023). https://www.euston96.com/humedad-relativa/

Gaubert, B., Bouarar, I., Doumbia, T., Liu, Y., Stavrakou, T., Deroubaix, A., et al. (2021). Global changes in secondary atmospheric pollutants during the 2020 COVID-19 pandemic. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126,

e2020JD034213.
https://doi.org/10.1029/2020JD034213

Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., McConnell, R., Kuenzli, N., Lurmann, F., Rappaport, E., Margolis, H., Bates, D., Peters, J. (2004). *The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age.* The New England Journal of Medicine, 351(11).
https://doi.org/10.1056/NEJMoa040610

Geoenciclopedia. (2022). *Que es la presión atmosférica y cómo se mide*. (Consultado enero 2023).
https://www.geoenciclopedia.com/que-es-la-presion-atmosferica-y-como-se-mide-559.html

Google.com., Informes de movilidad de las comunidades ante el COVID-19., acceso mayo del 2023.,
https://www.google.com/covid19/mobility/?hl=es-419

Gobierno de Canarias, España. (2022). *Óxidos de Nitrógeno, ¿qué son?* (Cons. Febrero de 2023). Consejería de Transición Ecológica, Gobierno de Canarias.
Calidad del aire (gobiernodecanarias.org)

Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., & Cowling, E. (2020). *Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy*. Ambio, 49(4).
https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4

Hamra, G. B., Laden, F., Cohen, A. J., Raaschou-Nielsen, O., Brauer, M., Loomis, D. (2015). *Lung cancer and exposure to nitrogen dioxide and traffic: A systematic review and meta-analysis.* Environmental Health Perspectives, 123(11).
https://doi.org/10.1289/ehp.1408882

Hidalgo, N. M. (2011). *Metodología para la validación de datos de calidad del aire generados por una red de monitoreo automático*. Tesis de Maestría UNAM, Repositorio Institucional.
https://tesiunam.dgb.unam.mx/

Huangfu, P., Atkinson, R. (2020). Long-term exposure to NO2 and O3 and all-cause and respiratory mortality: *A systematic review and meta-analysis*. Environment International, 144(105998).
https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998

Kang, Y. J., Tan, H.-Y., Lee, C. Y., & Cho, H. (2021). *An air particulate pollutant induces neuroinflammation and neurodegeneration in human brain models.* Advanced Science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany), 8(21).
https://doi.org/10.1002/advs.202101251

Kim, B.-J., Kwon, J.-W., Seo, J.-H., Kim, H.-B., Lee, S.-Y., Park, K.-S., Yu, J., Kim, H.-C., Leem, J.-H., Sakong, J., Kim, S.-Y., Lee, C.-G., Kang, D.-M., Ha, M., Hong, Y.-C., Kwon, H.-J., Hong, S.-J. (2011). *Association of ozone exposure with asthma, allergic rhinitis, and allergic sensitization*. Annals of Allergy, Asthma & Immunology: Official Publication of the American College of Allergy, Asthma, & Immunology, 107(3).
https://doi.org/10.1016/j.anai.2011.05.025

Kim, S.-Y., Kim, E., & Kim, W. J. (2020). *Health effects of ozone on respiratory diseases.* Tuberculosis and Respiratory Diseases. 83 (Supple 1).
https://doi.org/10.4046/trd.2020.0154

Kreci, P., Targino, A., C., Oukawa, G., Cassino, R., P. (2022). *Drop in urban air pollution from COVID-19 pandemic, Policy implications for the megacity of Sao Paulo.* Env. Pollution (265).
https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114883

Kroll, J.H., Heald, C.L., Cappa, C.D. et al. The complex chemical effects of COVID-19

shutdowns on air quality. (2020). Nat. Chem. 12, 777–779. https://doi.org/10.1038/s41557-020-0535-z

International Agency for Research on Cancer (IARC). (1983). Polynuclear aromatic compounds, Part 1, chemical, environmental, and experimental data. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans 32. http://publications.iarc.fr/50

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2008). *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 99. Some Aromatic Amines, Organic Dyes, and Related Exposures*. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. http://publications.iarc.fr/50

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2010). *Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures.* IARC Monographs Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans 92. http://publications.iarc.fr/50

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). *Chemical Agents and Related Occupations*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 100F. http://publications.iarc.fr/50

Lang P.E. , Carslaw D.C., Moller S.J., (2019). A trend analysis approach for air quality network data, Atmospheric Environment: X, Volume 2, 100030, ISSN 2590-1621, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100030.

Le, T., Wang, Y., Liu, L., Yang, J., Yung, Y., Li, G., Seinfeld, J. (2020). *Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China*. Science 369. https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.abb7431

Lee, K. K., Spath, N., Miller, M. R., Mills, N. L., Shah, A. S. V. (2020). *Short-term exposure to carbon monoxide and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis*. Environment International, 143(105901). https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105901

Lian, X., Huang, J., Huang, R., Liu, C., Wang, L., Zhang, T. (2020). *Impact of city lockdown on the aire quality of COVID-19-hit lf Wuhan city.* Sc. Of the Total Environment 742. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140556

Li, S., Cao, S., Duan, X., Zhang, Y., Gong, J., Xu, X., Guo, Q., Meng, X., Bertrand, M., Zhang, J. J. (2020). *Long-term exposure to PM2.5 and Children's lung function: a dose-based association analysis*. Journal of Thoracic Disease, 12. https://doi.org/10.21037/jtd-19-crh-aq-007

Li, X., Chen, Q., Zheng, X., Li, Y., Han, M., Liu, T., Xiao, J., Guo, L., Zeng, W., Zhang, J., & Ma, W. (2019). *Effects of ambient ozone concentrations with different averaging times on asthma exacerbations: A meta-analysis*. The Science of the Total Environment, 691. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.382

Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo, C., A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Matus, P., Valdes, O., N., Osorio, G., S., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado, D., M., Cruz, J., Kan, H. (2019). *Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities*. The New England Journal of Medicine, 381 https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364

Mehr, M.R., Keshavarzi, B., Sorooshian, A. (2019). *Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran costal site.* Science of the total environment, 50 (2). https://doi.org/10.1007/s13280-020-01408-7

MeteoGalicia. (2020). *Glosario de Meteorología: El viento*. Consultado enero 2023. https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/aire2.action?request_locale=es

Núñez, S. (2020). *Elementos y factores del clima –Resumen*. Ecología Verde. Consultado diciembre 2022. https://www.ecologiaverde.com/elementos-y-factores-del-clima-3167.html

O'Brien, E., Masselot, P., Sera, F., Roye, D., Breitner, S., Ng, C. F. S., de Sousa, Z., Stagliorio, C., M., Madureira, J., Tobias, A., Vicedo, C., A. M., Bell, M. L., Lavigne, E., Kan, H., Gasparrini, A., MCC. (2023). *Short-term association between sulfur dioxide and* mortality: *A multicountry analysis in 399 cities.* Environmental Health Perspectives, 131. https://doi.org/10.1289/EHP11112

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N. (2021). *Short-term exposure to sulphur dioxide (SO2) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis.* Environment International, 150 https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434

Pérez, G. (2020). *Precipitación. Ciclo Hidrológico*. Geoenciclopedia. Consultado enero 2022. https://www.geoenciclopedia.com/precipitacion-20.html

Pietrogrande M.C., Bacco D., Demaria G., Russo M., Scotto F., Trentini A. (2022). *Polycyclic aromatic hydrocarbons and their oxygenated derivatives in urban aerosol: levels, chemical profiles, and contribution to $PM_{2.5}$ oxidative potential*. Env. Sc. and Pollution Res. 29. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16858-z

Ramdahl, T. (1983). *Retene a molecular marker of wood combustion in ambient air*. Nature, 306. https://www.nature.com/articles/306580a0

Rastegari Mehr, M., Keshavarzi, B., & Sorooshian, A. (2019). *Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site*. The Science of the Total Environment, 668, 1213–1221. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.082

Rathod, A., Sahu, S. K., Singh, S., Beig, G. (2021). *Anomalous behaviour of ozone under COVID-19 and explicit diagnosis of O3-NOx-VOCs mechanism*. Heliyon, 7(2). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06142

Rodríguez U., D., Rodríguez U., L. (2020). *Air quality during the COVID-19, PM2.5 analysis in the 50 most polluted capital cities.* Environ. Pollution (266). https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115042

Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T. (1993). *Sources of fine organic aerosol: 2. noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks.* Env. Sc. and Tech. 27. https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00041a007

Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T. (1993). *Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust*. Env. Sc. and Tech. 27. https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es00046a019

Rowdhwal S.S.S., Chen J. (2018). *Toxic effects of di-2-ethylhexyl phthalate: an overview*. BioMed research Int. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5842715/

Rosseland, B. O. (2021). *The legacy from the 50 years of acid rain research, forming present and future research and monitoring of ecosystem impact: Acidification*. Ambio, 50.

https://doi.org/10.1007/s13280-020-01408-7

Saha, L., Kumar, A., Kumar, S., Korstad, J., Srivastava, S., Bauddh, K., (2022). *The impact of the COVID-19 lockdown on global air quality: A review.* National Library of Medicine Springer Nature-PMC Collection. 10.1007/s42398-021-00213-6

Salcedo D., Onasch T. B., Dzepina K., Canagaratna M. R., Zhang Q., Huffman J. A., DeCarlo P. F., Jayne J. T., Mortimer P., Worsnop D. R., Kolb C.E., Johnson K. S., Zuberi B., Marr L. C., Volkamer R., Molina L. T., Molina M. J., Cardenas B., Bernabé R. M., Márquez C., Gaffney J. S., Marley N. A., Laskin A., Shutthanandan V., Xie Y., Brune W., Lesher R., Shirley T., Jimenez, J. L. (2006). *Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA-2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite. Atmospheric*. Chemistry and Physics 6.
https://acp.copernicus.org/articles/6/925/2006/

Salcedo, D., Alvarez O. H., Peralta, O., Castro, T. (2018). *PM1 chemical characterization during the ACU15 campaign, south of Mexico City*. Atmosphere, 9. https://www.mdpi.com/2073-4433/9/6/232

Schauer J., Kleeman M., Cass G., Simoneit B.R. (2002). *Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1-C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles.* Env. Sci. and Tech. 36.
https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es0108077

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (1997). *Informe anual de lluvia ácida 1996*.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_lluvia_acida_1996/

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017*.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2017.pdf

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2020). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018*.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2018.pdf

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2022). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2019*.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2019.pdf

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA). (2008). *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2006.*
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-zmvm-criterio2006/#p=1

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2010*). Inventario de Emisiones de la ZMVM 2008*.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-zmvm-criterio2008/#p=1

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2021*). Inventario de Emisiones de la ZMVMéxico 2018*.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2020). *Reporte del clima en México: Reporte anual 2020 CONAGUA*. Consultado en diciembre 2022. https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmos

f%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2020.pdf.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2020). *Reporte del clima en México: Reporte mensual de abril, mayo y noviembre 2020*. Consultado en enero 2023. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias

Shen, S., Li, X., Yuan, C., Huang, Q., Liu, D., Ma, S., Hui, J., Liu, R., Wu, T., Chen, Q. (2020). *Association of short-term exposure to sulfur dioxide and hospitalization for ischemic and hemorrhagic stroke in Guangzhou, China*. BMC Public Health, 20(1), 263. https://doi.org/10.1186/s12889-020-8354-0

Sicard, P., Paoletti, E., Agathokleous, E., Araminien_ e, V., Proietti, C., Coulibaly, F., De Marco, A. (2020). *Ozone weekend effect in cities: Deep insights for urban air pollution control. Environ*. Res. 191. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110193

Sicard, P., De Marco, A., Agathokleous, E., Feng, Z., Xu, X., Paoletti, E., Rodriguez, J., Calatayud, V., (2020). *Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown*. Sci. Total Environ. 735. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139542

Simoneit B.R., Schauer J.J., Nolte C.G., Oros D R., Elias V.O., Fraser M.P., Rogge W.F., Cass G. R. (1999). *Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles*. Atmospheric Environment, 33. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231098001459

Slezakova, K., Pereira, M.C., (2021). *COVID-19 lockdown and the impacts on air quality with emphasis on urban, suburban and rural zones.* Sci. Report. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99491-7

Sokhi, R.S., Singh, V., Querol, X., Finardi, S., Targino, A.,C,, Andrade. M..F., Pavlovic. R,, Garland. R. M., Massagué, J., Kong S., Baklanov. A, Ren L., Tarasova, O., Carmichael, G., Peuch, V.,H., Anand V, Arbilla G, Badali K, Beig G, Belalcazar LC, Bolignano A, Brimblecombe P, Camacho P, Casallas A, Charland JP, Choi J, Chourdakis E, Coll I, Collins M, Cyrys J, da Silva CM, Di Giosa AD, Di Leo A, Ferro C, Gavidia-Calderon M, Gayen A, Ginzburg A, Godefroy F, Gonzalez Y.,A., Guevara, L.,M., Haque, S.,M., Havenga H, Herod D, Hõrrak U, Hussein T, Ibarra S, Jaimes, M., Kaasik, M., Khaiwal, R., Kim J., Kousa, A., Kukkonen, J., Kulmala M, Kuula J., La Violette, N., Lanzani ,G., Liu, X., Mac Dougall, S., Manseau, P.,M., Marchegiani, G., McDonald, B., Mishra, S.,V.,, Molina, L.,T., Mooibroek D, Mor S., Moussiopoulos N., Murena F., Niemi J.V., Noe S, Nogueira T., Norman M, Pérez, C.L, Petäjä T, Piketh S, Rathod A, Reid K, Retama A, Rivera O, Rojas N., Rojas, Q., San José R, Sánchez O, Seguel RJ, Sillanpää S, Su Y, Tapper N, Terrazas A, Timonen H, Toscano D, Tsegas G, Velders G., Vlachokostas C., Von Schneidemesser E, Vpm R, Yadav R, Zalakeviciute R, Zavala M. *A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions*. Environ Int. 2021. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34425482/

Sosa E.R., Alarcón J.A.L., Torres B.M.C., Sanchez A.P., Granados H.E., Vega E., Jaimes P.M., Retama A., Gay D.A. (2023). "Sulfur and nitrogen compounds in ambient air and in wet atmospheric deposition at the Mexico City Metropolitan Area". Atmospheric Environment. 292, 119411. Indizada en JCR. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119411

Tang, R., Xin Huang, Derong Zhou, Haikun Wang, Jiawei Xu, Aijun Ding, (2021). Global air quality change during the COVID-19 pandemic: Regionally different ozone pollution responses

COVID-19: Atmospheric and Oceanic Science Letters, Volume 14, Issue 4, 100015, ISSN 1674-2834, https://doi.org/10.1016/j.aosl.2020.100015.

Thangavel, P., Park, D., Lee, Y.-C. (2022). *Recent insights into particulate matter (PM2.5)-mediated toxicity in humans: An overview*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(12). https://doi.org/10.3390/ijerph19127511

Tobías, A., Carnerero, C., Reche, C., Massague, J., Via, M., Minguillon, M., C., Alastuey, A., Querol, X. (2020). *Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month intro the SARS-COV-2 epidemic*. Sc. Of the Total Environment 726. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138540

Torres, M.,R. (2022). *Emisiones de Dióxido de Azufre (SO2), Notas Internacionales*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile /BCN, Asesoria Técnica Parlamentaria, https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33431/1/Normas_Internacionales_para_las_Emisiones_de_Dioxido_de_Azufre.pdf

Townsend, C. L., Maynard, R. L. (2002*). Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide*. Occupational and Environmental Medicine, 59(10). https://doi.org/10.1136/oem.59.10.708

Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM - CCA. (2017). Análisis del estado del arte sobre el depósito atmosférico en México y su relación con el cambio climático. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/410254/INFORME_FINAL_EADAM_V3_INECC.pdf

U.S. EPA. (2019). *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2019*). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-19/188, 2019. https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534

U.S. EPA. (2020). *Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants* (Final Report, Apr 2020). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-20/012, 2020. https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=348522

U.S. EPA. *Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides – Health Criteria (Final Report, Dec 2017)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/451, 2017. https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=338596

U.S. EPA. (2022). *Health effects of ozone pollution.* https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution

U.S. EPA ((2022). Sulfure Dioxide Basics. Sulfur Dioxide Basics | US EPA

U.S. EPA. (2020). *Integrated science assessment (ISA) for Carbon monoxide (Final report Jan 2010).* Integrated Science Assessment (ISA) for Carbon Monoxide (Final Report, Jan 2010) | ISA: Integrated Science Assessments | Environmental Assessment | US EPA

Vega, E., Namdeo, A., Bramwell, L., Miquelajauregui, Y., Resendiz, M., C. G., Jaimes P.,M., Luna, F., F., Terrazas, A., A., Maji, K. J., Entwistle, J., Enríquez, J. C. N., Mejia, J. M., Portas, A., Hayes, L., McNally, R. (2021). *Changes in air quality in Mexico City, London and Delhi in response to various stages and levels of lockdowns and easing of restrictions during COVID-19 pandemic*. Environmental Pollution

(Barking, Essex: 1987), 285. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117664

Vega E., Eidels S., Ruiz H., López, V. D., Sosa G., González E., Gasca J., Mora V., Reyes E., Sánchez R., G., Villaseñor R.C., Chow J., Watson J., Edgerton S. (2010). *Particulate air pollution in Mexico City: a detailed view*. Aerosol and Air Quality Research 10. https://aaqr.org/articles/aaqr-09-06-oa-0042

Wang, X., Xu, Z., Su, H., Ho, H. C., Song, Y., Zheng, H., Hossain, M. Z., Khan, M. A., Bogale, D., Zhang, H., Wei, J., Cheng, J. (2021). *Ambient particulate matter (PM1, PM2.5, PM10) and childhood pneumonia: The smaller particle, the greater short-term impact*? he Science of the Total Environment, 772. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145509

World Health Organization, WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. (2021*). World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

World Health Organization (WHO). (2023). *Weekly epidemiological update on COVID-19*. https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update-on-covid-19.

Ye, M., Yang, J., Li, J., Wang, Y., Chen, W., Zhu, L., Wang, T., Liu, J., Geng, D., Yu, Z. (2023). *Progress in mechanisms, pathways and cohort studies about the effects of PM2.5 exposure on the central nervous system*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 261(1). https://doi.org/10.1007/s44169-023-00034-0

Zheng, X.-Y., Orellano, P., Lin, H.-L., Jiang, M., Guan, W.-J. (2021). *Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis*. Environment International, 150). https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106435

Zheng, X.-Y., Orellano, P., Lin, H.-L., Jiang, M., Guan, W.J. (2021). *Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis*. Environment International, 150. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106435

INFORME ANUAL
2020

ANEXO 1

Configuración del Sistema de Monitoreo Atmosférico

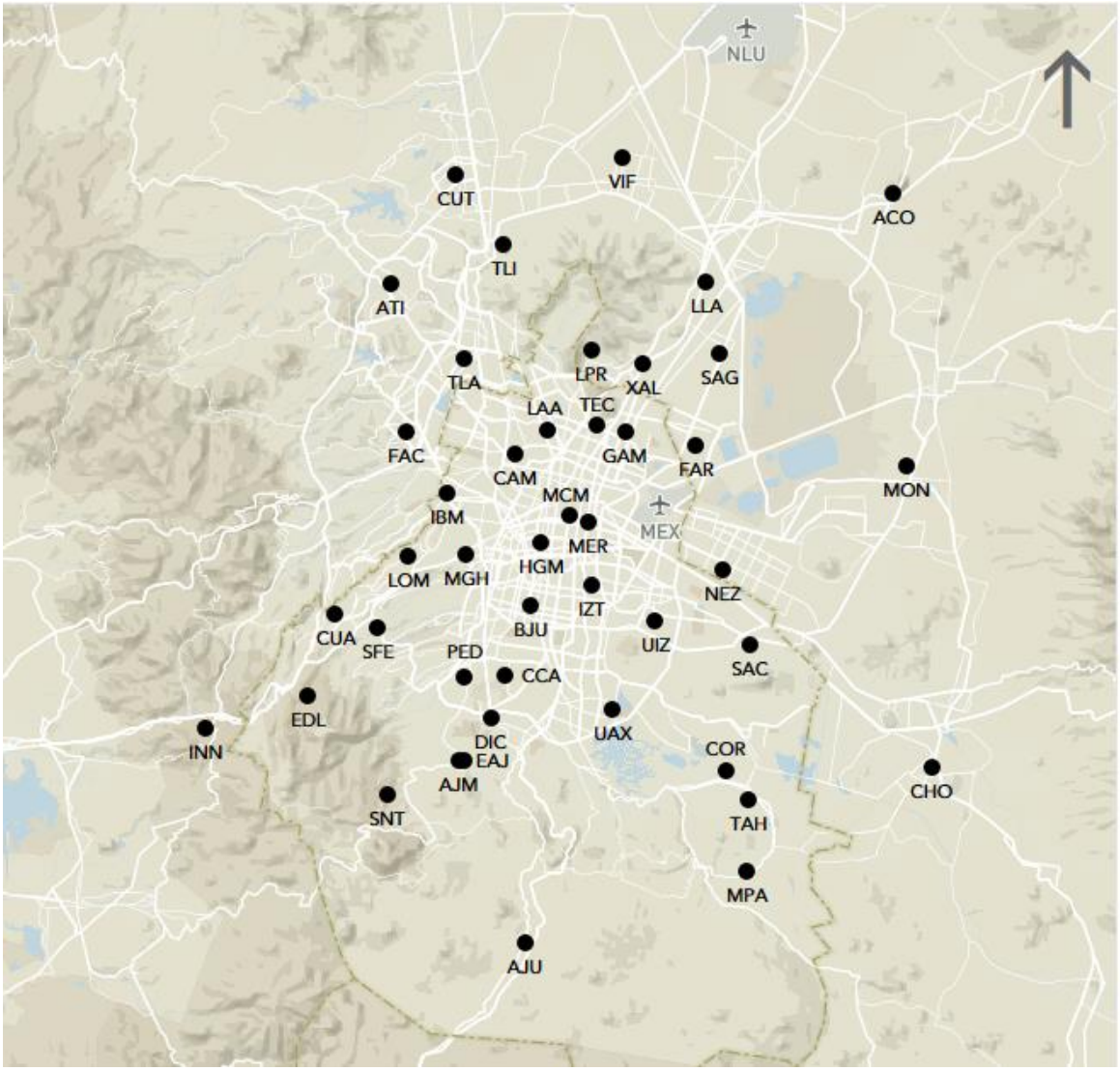


Figura A.I.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

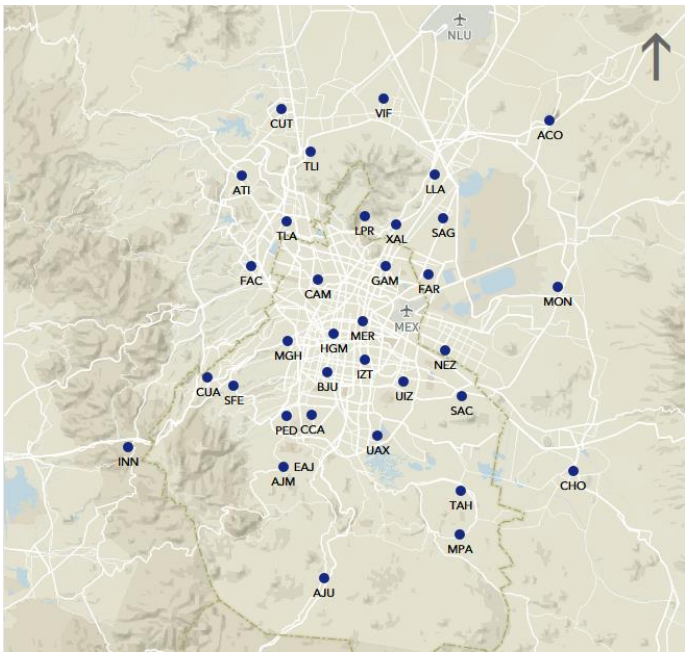


Figura A.I.2. Estaciones de la RAMA en operación en 2020.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)

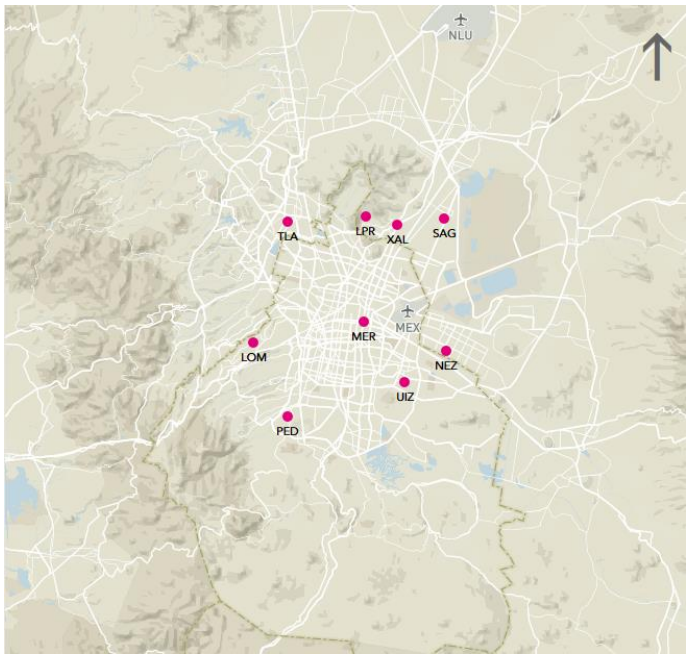


Figura A.I.3. Estaciones de la REDMA en operación en 2020

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

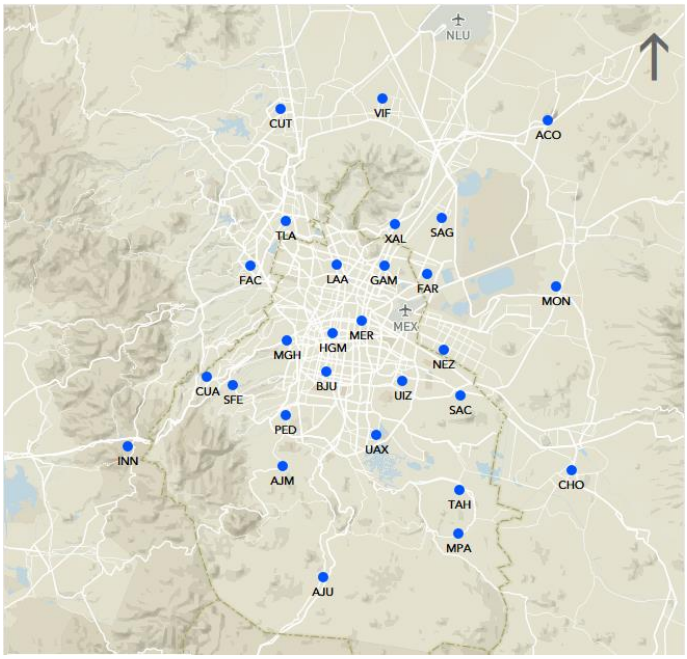


Figura A.I.4. Estaciones de la REDMET en operación en 2020

Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

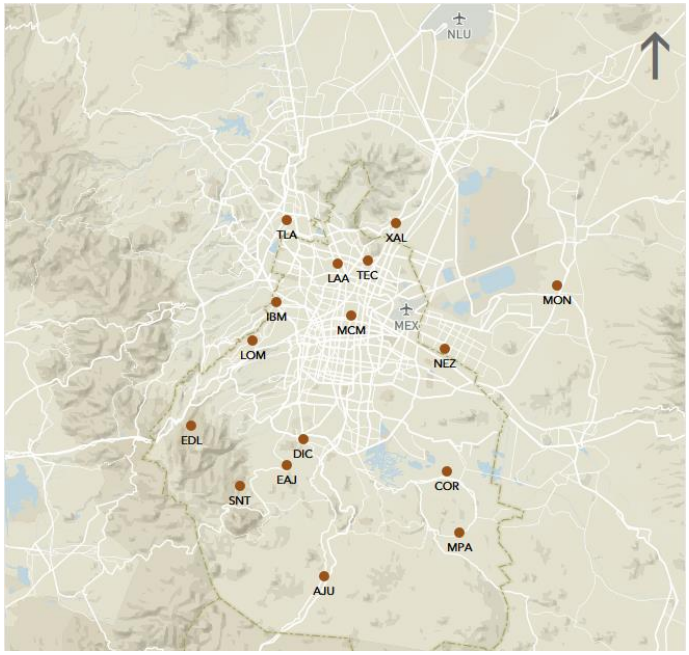


Figura A.I.5. Estaciones de la REDDA en operación en 2020

Tabla A.I.1. Estaciones que integran la RAMA en la CDMX

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	Parámetros								
					O_3	NOx	NO_2	NO	CO	SO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$
Ciudad de México	A. Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Azcapotzalco	Camarones	CAM	Ago – 2003	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015	■		■		■	■	■	■	■
	Coyoacán	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	Ago – 2014	■	■	■	■	■	■		■	
		UAM Xochimilco	UAX	Feb – 2012	■	■	■	■	■	■		■	
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■	■		
		Santa Fe	SFE	Feb – 2012	■	■	■	■	■	■	■		■
	Cuauhtémoc	Hospital Gral de México	HGM	Feb - 2012	■	■	■	■	■	■	■	■	
	G. A. Madero	G. A. Madero	GAM	Dic – 2015	■		■				■	■	
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul – 2007	■	■	■	■	■	■	■		
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Santiago Acahualtepec	SAC	Mar-2019	■		■	■	■	■		■	■
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Ene – 2015	■	■	■	■	■	■			■
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016	■				■	■			■
	Tlalpan	Ajusco	AJU	Ene – 2015	■							■	
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	V. Carranza	Merced	MER	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■	■		

Tabla A.I.1. (Continuación) Estaciones que integran la RAMA en el Estado de México

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	Parámetros								
					O_3	NOx	NO_2	NO	CO	SO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2007		■	■	■		■	■		
	Atizapán	Atizapán	ATI	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■	■		
	Chalco	Chalco	CHO	Jul – 2007									
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■	■		
	Ecatepec	Los Laureles	LLA	Feb – 1986	■	■	■	■	■	■			
		San Agustín	SAG	Feb – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986									
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■		
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011	■		■	■	■	■		■	■
		FES Aragón	FAR	Mar-2019	■				■	■		■	
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Ago – 2015	■				■	■	■	■	■
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012	■	■	■	■		■	■		
	Texcoco	Montecillo	MON	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■		■	■
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene – 1986	■				■	■			
		Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov – 1993	■	■	■	■	■	■			

Tabla A.I.2. Estaciones que integran la REDMA

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	PST	PM10	PM2.5
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1989		■	■
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene – 1989	■	■	■
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	Ene – 1989		■	
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1989		■	■
Estado de México	Ecatepec	San Agustín	SAG	Ago – 2003			■
		Xalostoc	XAL	Ene – 1989	■	■	■
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Ene – 1989		■	
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1989	■	■	■
		La Presa	LPR	Ene – 1989		■	

Tabla A.I.3. Estaciones que integran la REDDA

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	P. pluvial	pH	H^+	CE	Aniones	Cationes
Ciudad de México	Cuajimalpa	Ex-Convento Desierto de los Leones	EDL	May - 1998	■	■	■	■	■	■
	Cuauhtémoc	Museo de la Ciudad de México	MCM	Jun - 1989	■	■	■	■	■	■
	Gustavo A. Madero	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	Jun - 1995	■	■	■	■	■	■
		Cerro del Tepeyac	TEC	Ago - 1988						
	Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT	Ago - 1998	■	■	■	■	■	■
	Miguel Hidalgo	Legaria	IBM	Jun - 1989						
		Lomas	LOM	Jun - 1988						
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	May - 1998						
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May - 1998	■	■	■	■	■	■
		Diconsa	DIC	Jun - 1988						
		Ecoguardas Ajusco	EAJ	Jun - 1998	■	■	■	■	■	■
	Xochimilco	CORENA	COR	Jun - 1990	■	■	■	■	■	■
Estado de México	Ecatepec	Xalostoc	XAL	May - 1989						
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jun - 1991						
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun - 1994	■	■	■	■	■	■
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Jun - 1989	■	■	■	■	■	■

Tabla A.I.4. Estaciones que integran la REDMET en la CDMX

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	Parámetros							
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-A	RUV-B	RADG	PA
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■		
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago – 2015	■	■	■	■				
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Feb - 2012	■	■	■	■				
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun – 2000	■	■	■	■				
	Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	Feb – 2012	■	■	■	■	■	■	■	
	Cuauhtémoc	Hospital Gral. México	HGM	Feb – 2012	■	■	■	■				■
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic – 2015	■	■	■	■				
		Lab. Análisis Ambiental	LAA	Ene – 2016	■	■	■	■	■	■		■
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr – 2014	■	■	■	■			■	
		Stgo. Acahualtepec	SAC	Mar-- 2019	■	■						
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Feb – 2015	■	■	■	■			■	
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene – 2016	■	■	■	■				■
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May – 2015	■	■	■					
		Ajusco Medio	AJM	Ene – 2015	■	■	■	■				■
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene – 1986	■	■	■	■		■	■	■
	Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun – 2000	■	■	■	■				

Tabla A.I.4. Estaciones que integran la REDMET en el Estado de México (continuación)

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio operación	Parámetros							
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-A	RUV-B	RADG	PA
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul – 2011	■	■	■	■			■	
	Chalco	Chalco	CHO	Jul – 2011	■	■	■	■	■	■	■	
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun – 2000	■	■	■	■				
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb – 1986	■	■	■	■	■	■		
		Xalostoc	XAL	Ene – 1986	■	■	■	■			■	■
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene – 1986	■	■	■	■	■	■		
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul – 2011	■	■	■	■				
		FES Aragón	FAR	Mar-- 2019	■	■	■	■				
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Sep – 2015	■	■	■	■				■
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb – 2012	■	■	■	■	■	■	■	■
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun – 2000	■	■	■	■	■	■	■	
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene – 1986	■	■	■	■			■	■

INFORME ANUAL
2020

ANEXO 2

Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico

Tabla A.II.1. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo ubicadas en la CDMX durante 2020.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	30/05/20	17:00	20/06/20	02:00	Falla de instrumento, falta de consumibles
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	11/12/20	13:00	31/12/20	24:00	Falla del instrumento
Coyoacán	Centro Ciencias de Atmósfera	CCA	RAMA	CO	19/03/20	14:00	24/06/20	24:00	Falla del instrumento, falta de consumibles
				$PM_{2.5}$	01/07/20	01:00	28/07/20	03:00	Falla del instrumento
Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	RAMA	PM_{10}	06/06/20	01:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				O_3	18/07/20	04:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				CO, NOx, NO_2, NO, SO_2	19/07/20	11:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
			REDMET	WDR, WSP	19/04/20	11:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				TMP, RH	19/07/20	11:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
	Santa Fe	SFE	RAMA	CO, SO_2	28/02/20	11:00	19/03/20	01:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	WDR, WSP	23/03/20	01:00	15/05/20	01:00	Falla de sensores
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				NO, NO_2, NOx	12/08/20	07:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				O_3, CO, SO_2	12/08/20	12:00	31/12/20	24:00	Falla de equipo, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
			REDMET	TMP, RH, WDR, WSP	25/03/20	15:00	12/08/20	14:00	Falla de sensores, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19

Tabla A.II.1. (Continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo ubicadas en la CDMX durante 2020.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	RAMA	O_3, NO_2	04/06/20	05:00	30/07/20	03:00	Falla de equipo aire acondicionado, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	07/03/20	18:00	30/07/20	02:00	Falla equipo aire acondicionado, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
			REDMET	RH, WDR, WSP	10/06/20	18:00	29/07/20	01:00	Falla de sensores, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
				TMP	10/06/20	18:00	10/07/20	01:00	Falla de sensores, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
Iztacalco	Iztacalco	IZT	RAMA	O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}	07/08/20	10:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sitio sin acceso por cierre debido a COVID-19
Iztapalapa	Santiago Acahualtepec	SAC	RAMA	O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2	20/01/20	01:00	05/02/20	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO_2	01/04/20	01:00	05/02/20	01:00	Falla instrumento, sin consumibles
				CO	23/05/20	22:00	10/07/20	01:00	Falla instrumento, sin consumibles
	UAM Iztapalapa	UIZ	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	14/11/20	24:00	05/12/20	02:00	Mantenimiento en laboratorio, sin consumibles
			REDMET	RH	01/01/20	01:00	21/03/20	01:00	Falla de sensor
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro de instrumento
				O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2	14/08/20	12:00	12/09/20	01:00	Trabajos de mantenimiento en instalaciones
			REDMET	WDR, WSP	08/06/20	01:00	12/09/20	01:00	Falla de sensores
				TMP	11/09/20	13:00	31/12/20	23:00	Trabajos de mantenimiento en instalaciones
Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	RAMA	$PM_{2.5}$	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro de instrumento
				O_3, CO, NO_2, SO_2	25/04/20	14:00	25/08/20	01:00	Sin comunicación, sin acceso por cierre debido a COVID-19
			REDMET	UVA, UVB	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro de sensores
				TMP, RH, WDR, WSP, PBa	25/04/20	14:00	25/08/20	01:00	Sin comunicación, sin acceso por cierre debido a COVID-19

Tabla A.II.1. (continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo ubicadas en la CDMX durante 2020.

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				NO, NO2, NOx	17/01/20	11:00	02/03/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				O_3, CO, SO_2	01/02/20	24:00	02/03/20	04:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				O_3	18/05/20	18:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				CO, NO, NO_2, NOx, SO_2	12/08/20	24:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
			REDMET	T	21/07/20	24:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				RH	24/07/20	17:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
	Ajusco	AJU	RAMA	O_3, $PM_{2.5}$	06/05/20	17:00	14/10/20	02:00	Falla sistema comunicación
			REDMET	RH	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, falta de consumibles
				T, WDR, WSP	06/05/20	17:00	14/10/20	02:00	Falla sistema comunicación
Venustiano Carranza	Merced	MER	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	21/07/20	23:00	28/08/20	02:00	Falla de instrumentos
			REDMET	UVA	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro del sensor
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	PM_{10}	05/05/20	15:00	17/10/20	02:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19

Tabla A.II.2. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Estado de México durante 2020.

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2,	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM_{10}	01/01/2020	01:00	23/07/20	02:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	TMP, WDR, WSP	17/04/20	20:00	22/07/20	01:00	Falla sistema de energía del sensor
				RH	21/04/20	01/00	31/12/20	24:00	Falla de sensor
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	O_3, CO, NOx, NO_2, NO, SO_2, PM_{10}	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Fuera de línea por falta de consumibles
			REDMET	TMP, RH, WDR, WSP, UVA, UVB	03/08/20	18:00	31/12/20	24:00	Fuera de línea por falta de consumibles
Coacalco de Berriozábal	Villa de las Flores	VIF	RAMA	PM_{10}	13/02/20	09:00	12/03/20	02:00	Actividades de construcción en los alrededores del sitio
Cuautitlán Izcalli	Cuautitlán	CUT	RAMA	NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}	13/07/20	09:00	21/08/20	01:00	Problemas con equipo de aire acondicionado
				O_3	13/07/20	09:00	25/08/20	01:00	Problemas con equipo de aire acondicionado
Ecatepec de Morelos	San Agustín	SAG	RAMA	SO_2	01/01/20	01:00	15/04/20	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO_2	25/05/20	09:00	04/07/20	02:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO},	14/09/20	13:00	17/10/20	01:00	Falla del equipo de aire acondicionado
			REDMET	TMP, RH, WDR, WSP	14/09/20	13:00	17/10/20	01:00	Falla del equipo de aire acondicionado
				UVA, UVB	14/09/20	13:00	31/12/20	24:00	Falla de sensores
	Los Laureles	LLA	RAMA	NO, NO_2, NOx	11/04/20	16:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
				O_3, CO, SO_2	29/08/20	01:00	31/12/20	24:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
	Xalostoc	XAL	RAMA	O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2, PM_{10}. $PM_{2.5}$	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Falla equipo aire acondicionado, sin acceso por cierre debido a COVID-19

Tabla A.II.2. (Continuación) Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Estado de México, durante 2020.

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Naucalpan de Juárez	FES Acatlán	FAC	RAMA	PM_{10}	22/04/20	01:00	29/05/20	02:00	Falla instrumentos, sin acceso por cierre debido a COVID-19
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	RAMA	$PM_{2.5}$	08/09/20	12:00	05/12/20	02:00	Reemplazo y adecuaciones de instrumentos
	FES Aragón	FAR	REDMET	TMP y RH	01/01/20	01:00	12/03/20	01:00	Inicio de medición 12/03/20
Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	RAMA	NOx, NO_2, NO, SO_2, PM_{10}	13/07/20	09:00	21/08/20	01:00	Problema con equipo de aire acondicionado
				O_3	13/07/20	09:00	25/08/20	01:00	Problemas con equipo de aire acondicionado
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	$PM_{2.5}$	01/08/20	02:00	05/12/20	02:00	Falla de equipo, mantenimiento en laboratorio
				NO, NO_2, NOx, SO_2	09/03/20	22:00	30/04/20	02:00	Sin comunicación con sitio, mantenimiento para puesta en línea
				O_3, CO	09/03/20	22:00	01/05/20	10:00	Sin comunicación con sitio, mantenimiento para puesta en línea
				$PM_{2.5}$	09/03/20	22:00	10/07/20	02:00	Sin comunicación con sitio, posterior falla de instrumento
			REDMET	TMP, RH, WDR, WSP, UVA, UVB	09/03/20	22:00	16/04/20	01:00	Sin comunicación con el sitio
Tlalnepantla de Baz	La Presa	LPR	RAMA	NO, NO_2, NOx	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro de equipo
				SO_2	07/05/20	04:00	14/10/20	01:00	Falla de instrumentos por falta de consumibles
				O_3, CO	30/05/20	01:00	14/10/20	01:00	Falla de equipo de aire acondicionado
	Tlalnepantla	TLA	RAMA	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	26/08/20	17:00	11/09/20	02:00	Falla del instrumento
				PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_{CO}	13/10/20	13:00	23/11/20	02:00	Falla del instrumento
			REDMET	UVA, UVB	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro de sensores
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	PM_{10}	01/01/20	01:00	31/12/20	24:00	Retiro de instrumento para mantenimiento, sin consumibles
				O_3, CO, NO, NO_2, NOx, SO_2	21/03/20	23:00	31/12/20	24:00	Falla del equipo de aire acondicionado, sin consumibles

Tabla A.II.3. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo de la REDMA ubicadas en la CDMX, durante 2020

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Fecha	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	REDMA	$PM_{2.5}$, PM_{10}	03, 09/02/20	Blanco de campo
				PM_{10}	16/03/20	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	02, 08/07/20	Otros
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	30/09/20	Sin acceso
				PM_{10}	24/10/20	Blanco de campo
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	REDMA	$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	10/01/20	Falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	03/02/20	Blanco de campo
				PST	03/02/20	Falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				$PM_{2.5}$	14/07/20	Otros
				PST	02, 08, 20, 26/07/20	Otros, falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$, PST	14, 20/07/20	Otros
				PST	26/07/20	Falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	31/08/20	Sin acceso
				PM_{10}	30/09/20	Falla de equipó
				PM_{10}	06/10/20	Blanco de campo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	11, 17, 23, 29/11/20	Sin acceso
Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	REDMA	PM_{10}	22, 28/01/20	Blanco de campo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				PM_{10}	01,07,13,18,25,31/08/20	Otros
Venustiano Carranza	Merced	MER	REDMA	$PM_{2.5}$	21/02/20	Blanco de campo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	02, 08/07/20	Otros
				$PM_{2.5}$	25/08/20	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	24/09/20	Sin acceso
				PM_{10}	30/09/20	Blanco de campo

Tabla A.II.4. Períodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en las estaciones de monitoreo de la REDMA ubicadas en el Estado de México, durante 2020

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Fecha	Motivo
Ecatepec	San Agustín	SAG	REDMA	$PM_{2.5}$	27/02/20	Blanco de campo
				$PM_{2.5}$	16/03/20	Falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				$PM_{2.5}$	02, 08/07/20	Otros
				$PM_{2.5}$	07/19/20	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$	30/09/20	Falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$	16, 12, 18, 30/10/20	Otros
	Xalostoc	XAL	REDMA	PM_{10}	22, 28/01/20	Blanco de campo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	27/02/20	Falla corriente eléctrica
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	REDMA	PM_{10}	03/02/20	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				PM_{10}	01, 07, 13, 31/08/20	Otros
Tlalnepantla	La Presa	LPR	REDMA	PM_{10}	04/01/20	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				PM_{10}	01, 13/08/20	Otros, falla de equipo
				PM_{10}	06/09/20	Falla de equipo
	Tlalnepantla	TLA	REDMA	PM_{10}	15/02/20	Falla de equipo
				PST	04, 10/03/20	Falla de equipo
				$PM_{2.5}$	16/03/20	Otros
				$PM_{2.5}$, PM_{10}, PST	28/03/20	Suspensión por COVID
				$PM_{2.5}$, PM_{10}	02/07/20	Otros
				$PM_{2.5}$	09/08/20	Blanco de campo
				$PM_{2.5}$	13/08/20	Falla de equipo
				PST	06, 30/09/20	Falla de equipo
				PST	12/10/20	Otros

INFORME ANUAL
2020

ANEXO 3

Nuevas estaciones de monitoreo atmosférico

Durante el año 2020 no se instalaron nuevas estaciones de monitoreo atmosférico.

Estaciones de monitoreo atmosférico sin datos durante 2020

Por motivo de las restricciones aplicadas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México ocasionadas por la pandemia de COVID-19, no fue posible el acceso en algunas estaciones, y en otros casos, la cadena de suministro de refacciones se cortó. Lo que dio como resultado que ciertas estaciones dejaran de registrar información durante todo el año 2020. La Tabla A.3.1 presenta aquellas estaciones que se vieron afectadas.

Tabla A.3.1. Estaciones que no generaron información durante 2020

Estación	Clave	Ubicación	Causa	SO_2	CO	O_3	NO	NO_2	NOx	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{CO}
Acolman	ACO	Palacio municipal	Sin consumibles									
Ajusco Medio	AJM	Hosp. Gral. Ajusco Medio	Sin acceso por COVID-19									
Chalco	CHO	Escuela Preparatoria 30	Sin consumibles									
FES Aragón	FAR	Facultad Estudios Aragón	Inicio medición 12/03/20									
Hosp. Gral. México	HGM	Hospital Gral. de México	Sin acceso por COVID-19									
Investigaciones Nucleares	INN	Investigaciones Nucleares	Sin acceso por COVID-19									
La Presa	LPR	Centro Atención Primaria	Se retiraron instrumentos									
Miguel Hidalgo	MGH	Faro del Saber Carmen Serdán	Se retiraron instrumentos									
Milpa Alta	MPA	Secundaria No 330	Sin acceso por COVID 19									
Santiago Acahualtepec	SAC	C. Rehabilitación Adicciones	Sin consumibles									
Tultitlán	TLI	Jardín Niños Luna Arroyo	Sin consumibles									
Xalostoc	XAL	Clínica No 67 IMSS	Sin acceso por COVID-19									

	No midió y si tiene analizador
	Sí midió
	No tiene analizador

INFORME ANUAL
2020

ANEXO 4

Estadísticas básicas

Tabla A.IV.1. Estadísticas básicas para **dióxido de azufre**, las unidades de concentración son ppb. Para la evaluación de la NOM, sólo se utilizaron en las estaciones que cumplen los criterios de suficiencia de datos para el cálculo del indicador de 1 hora y que cumplen con los requerimientos del apartado A.1.2.2 para el valor límite de 24 horas de la NOM-022-SSA1-2019.

Entidad	Estación	Clave	% datos válidos	Trimestres con >75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM				
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Suficiencia trianual (años completos)	Máximo promedio 24 h	Máximo promedio 1 h	Suficiencia (1h)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	51	1	56	2	0	4	1	0	1	1	2	5	1	23	45	*	No
	Benito Juárez	BJU	95	4	71	3	0	6	2	0	1	1	3	8	2	31	62	*	No
	Camarones	CAM	96	4	102	4	0	8	3	1	1	2	4	10	1	47	97	*	No
	C. Ciencias Atmósf.	CCA	96	4	67	3	0	5	2	0	1	1	3	6	3	23	54	A	Sí
	Cuajimalpa	CUA	49	2	63	3	0	4	2	0	1	1	3	6	2	23	52	*	No
	H. Gral. de México	HGM	50	1	58	3	0	6	2	0	0	1	2	6	2	35	89	*	No
	Iztacalco	IZT	57	2	83	4	0	6	2	1	1	2	3	8	1	35	69	*	No
	Merced	MER	94	4	94	4	0	7	3	1	1	2	4	9	3	42	74	A	No
	Miguel Hidalgo	MGH	87	3	72	4	0	6	3	0	1	2	4	10	3	30	61	*	No
	Milpa Alta	MPA	64	2	37	2	0	3	1	1	1	1	2	5	2	16	33	*	No
	Pedregal	PED	94	4	78	2	0	5	2	0	0	1	2	6	3	19	45	A	Sí
	S. Acahualtepec	SAC	63	3	101	3	0	5	2	0	1	2	3	5	*	—	51	*	No
	Santa Fe	SFE	89	4	79	3	0	4	2	1	1	1	3	6	3	17	42	A	Sí
	Tláhuac	TAH	94	4	44	2	0	3	1	0	1	1	2	4	1	13	30	*	No
	UAM Xochimilco	UAX	84	3	48	2	0	4	1	0	1	1	2	5	3	17	39	A	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	4	76	3	0	5	2	1	1	2	3	6	3	26	59	A	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—	—	*	Inválido
	Atizapán	ATI	93	4	102	4	0	7	3	1	1	2	4	10	2	39	89	*	No
	Chalco	CHO	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—	—	*	Inválido
	Cuautitlán	CUT	85	3	126	4	0	8	3	1	1	2	4	10	3	51	104	B	No
	FES Acatlán	FAC	96	4	91	4	0	7	3	0	1	2	4	10	1	26	80	*	No
	FES Aragón	FAR	95	4	72	3	0	5	1	1	1	1	2	5	1	18	54	*	No
	I. Invest. Nucleares	INN	95	4	47	1	0	2	1	0	0	1	1	2	3	8	21	*	No
	Los Laureles	LLA	61	2	75	2	0	5	2	0	0	1	2	5	2	41	91	*	No
	La Presa	LPR	54	2	53	3	0	4	3	1	1	2	4	7	3	20	-	*	No
	Montecillo	MON	79	2	46	2	0	2	0	0	1	1	1	3	1	8	27	A	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	93	4	106	3	0	6	2	1	1	2	3	6	2	28	69	*	No
	San Agustín	SAG	49	2	109	3	0	5	2	1	1	1	3	5	*	—	93	*	No
	Tlalnepantla	TLA	93	4	142	6	0	10	4	1	2	3	6	15	3	52	108	T	No
	Tultitlán	TLI	21	1	146	9	0	14	8	1	2	4	10	25	1	64	153	*	No
	Villa de las Flores	VIF	92	4	170	5	0	12	3	1	1	2	4	11	2	67	147	B	No
	Xalostoc	XAL	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	22	—	*	Inválido

*** Sin suficiencia, A: prueba de sustitución A; B: prueba de sustitución B; T: trimestre válido 1h**

Tabla A.IV.2. Estadísticas básicas para **dióxido de nitrógeno**, las unidades de concentración son ppb.

Entidad	Estación	Clave	% datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM	
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. horas >210 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	47	62	12	1	7	8	5	7	11	15	22	0	Sí
	Benito Juárez	BJU	96	82	20	2	11	16	7	11	18	27	35	0	Sí
	Camarones	CAM	96	107	25	2	13	18	10	15	23	33	43	0	Sí
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	92	86	17	1	9	12	7	10	15	22	30	0	Sí
	Cuajimalpa	CUA	50	91	15	1	10	12	6	8	12	20	30	0	Sí
	Gustavo A. Madero	GAM	81	90	21	2	13	19	7	11	19	30	39	0	Sí
	H. Gral. de México	HGM	55	95	21	1	11	16	9	12	19	28	36	0	Sí
	Iztacalco	IZT	57	118	24	4	12	17	11	14	21	31	39	0	Sí
	Merced	MER	90	98	27	3	13	18	12	17	26	35	45	0	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	82	95	23	3	12	16	10	14	20	30	39	0	Sí
	Milpa Alta	MPA	64	39	7	0	5	6	2	3	5	9	14	0	Sí
	Pedregal	PED	95	73	16	0	10	13	6	9	14	22	30	0	Sí
	S. Acahualtepec	SAC	92	115	20	0	12	16	7	10	17	26	36	0	Sí
	Santa Fe	SFE	94	81	16	1	10	11	7	10	17	21	29	0	Sí
	Tláhuac	TAH	94	62	12	0	8	11	4	6	11	17	24	0	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	90	85	18	1	10	14	7	10	16	24	30	0	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	98	22	2	12	18	8	12	21	30	38	0	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	Atizapán	ATI	91	99	17	1	10	12	6	9	14	21	31	0	Sí
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	Cuautitlán	CUT	86	74	17	2	10	15	6	9	16	24	31	0	Sí
	FES Acatlán	FAC	95	113	20	0	12	14	8	11	17	25	35	0	Sí
	FES Aragón	FAR	96	73	17	2	10	16	5	8	15	24	31	0	Sí
	Los Laureles	LLA	27	85	25	4	12	16	11	16	24	32	41	0	Sí
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	Montecillo	MON	80	62	13	0	9	12	4	6	11	18	26	0	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	95	84	20	3	11	16	8	11	18	27	36	0	Sí
	San Agustín	SAG	87	72	20	3	11	15	8	12	18	27	35	0	Sí
	Tlalnepantla	TLA	92	96	26	3	12	16	13	17	24	33	42	0	Sí
	Tultitlán	TLI	21	106	26	3	14	19	10	5	24	34	43	0	Sí
	Villa de las Flores	VIF	94	93	17	1	11	16	5	8	14	24	33	0	Sí
	Xalostoc	XAL	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido

Tabla A.IV.3. Estadísticas básicas para **monóxido de carbono**, las unidades de concentración son ppm.

Entidad	Estación	Clave	% de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM	
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 8 h (11 ppm)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	51	1.2	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.9	Inválido
	Benito Juárez	BJU	94	2.1	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.3	Sí
	Camarones	CAM	96	3.5	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.8	Sí
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	71	2.3	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1	Inválido
	Cuajimalpa	CUA	50	1.7	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	1	Inválido
	Hospital General de México	HGM	56	2.4	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.3	Inválido
	Iztacalco	IZT	56	3.1	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.8	Inválido
	Merced	MER	91	3.1	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.7	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	87	3.1	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.6	Sí
	Milpa Alta	MPA	60	1.1	0.2	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	Inválido
	Pedregal	PED	91	2	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1	Sí
	S. Acahualtepec	SAC	80	4	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	2.5	Sí
	Santa Fe	SFE	84	1.3	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.8	Sí
	Tláhuac	TAH	94	2.7	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.6	Sí
	UAM Xochimilco	UAX	94	2.3	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.4	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	2.7	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.4	Sí
Estado de México	Acolman	ACO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	Atizapán	ATI	88	2.3	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.4	Sí
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	FES Acatlán	FAC	96	3.6	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3	0.4	0.8	1.8	Sí
	FES Aragón	FAR	92	2.1	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	1.1	Sí
	I. Nacional Investigación Nucleares	INN	95	0.7	0.1	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	Sí
	Los Laureles	LLA	64	3.9	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.9	Inválido
	La Presa	LPR	59	4.3	0.6	0	0.5	0.6	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	2.2	Inválido
	Montecillo	MON	68	2.8	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.3	Inválido
	Nezahualcóyotl	NEZ	91	4.6	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	2.1	Sí
	San Agustín	SAG	86	3.7	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.7	Sí
	Tlalnepantla	TLA	92	2.9	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.5	Sí
	Tultitlán	TLI	21	2.9	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1	2.2	Inválido
	Villa de las Flores	VIF	94	3.6	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	2.1	Sí
	Xalostoc	XAL	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido

Tabla A.IV.4. Estadísticas básicas para **ozono**, las unidades son ppb. Sólo las estaciones con ≥ 75% de datos válidos se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	% de datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. horas >95 ppb (1 h)	Máximo promedio 8h (70 ppb (8 h)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	28	134	50	0	25	32	20	33	46	65	86	136	108	No
	Ajusco	AJU	53	120	33	0	25	40	4	11	27	51	70	48	95	No
	Benito Juárez	BJU	93	119	29	0	25	35	3	9	23	44	68	94	92	No
	Camarones	CAM	95	137	29	0	28	40	2	5	20	45	72	226	108	No
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	95	159	35	0	29	40	4	12	28	52	79	355	114	No
	Cuajimalpa	CUA	50	135	41	0	25	33	10	22	36	55	77	157	107	No
	Gustavo A. Madero	GAM	81	133	31	0	28	42	1	7	24	49	74	197	103	No
	Hospital General de México	HGM	56	150	37	0	29	42	4	13	30	55	80	204	105	No
	Iztacalco	IZT	57	134	33	0	28	42	2	9	25	51	76	168	100	No
	Merced	MER	94	146	29	0	28	40	2	6	21	46	72	204	108	No
	Miguel Hidalgo	MGH	88	147	32	0	28	38	3	10	25	48	75	246	105	No
	Milpa Alta	MPA	63	143	44	0	22	29	19	28	40	57	75	140	104	No
	Pedregal	PED	95	153	36	0	27	36	7	16	29	52	78	311	112	No
	S. Acahualtepec	SAC	91	133	34	0	26	39	3	12	29	51	74	166	105	No
	Santa Fe	SFE	90	151	37	0	27	35	8	17	30	52	77	293	117	No
	Tláhuac	TAH	95	143	36	0	26	38	8	15	29	53	74	187	107	No
	UAM Xochimilco	UAX	96	146	35	0	28	41	4	12	29	53	77	294	107	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	94	136	32	0	28	41	2	9	25	50	76	257	103	No
Estado de México	Acolman	ACO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	Atizapán	ATI	93	132	27	0	21	29	3	10	21	39	58	27	99	No
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido
	Cuautitlán	CUT	82	128	26	0	25	41	1	3	19	44	64	63	107	No
	FES Acatlán	FAC	95	125	29	0	23	31	4	11	22	42	64	79	97	No
	FES Aragón	FAR	93	126	33	0	26	39	3	11	27	50	72	147	96	No
	I. Nacional de Investigaciones Nucleares	INN	95	112	35	1	18	24	15	22	32	46	61	31	89	No
	Los Laureles	LLA	63	98	26	0	21	33	2	7	20	40	58	5	79	No
	La Presa	LPR	60	116	25	0	22	34	2	5	21	39	58	28	92	No
	Montecillo	MON	79	117	29	0	23	36	1	8	25	44	61	24	86	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	95	121	31	0	24	37	3	11	25	48	68	88	94	No
	San Agustín	SAG	87	116	26	0	21	30	2	9	21	39	58	19	84	No
	Tlalnepantla	TLA	95	130	26	0	23	31	2	8	19	39	60	64	102	No
	Tultitlán	TLI	21	123	26	0	25	36	2	5	18	41	66	27	99	No
	Villa de las Flores	VIF	92	135	30	0	24	37	2	9	24	46	66	71	106	No
	Xalostoc	XAL	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Inválido

Tabla A.IV.5. Estadísticas básicas para **óxidos de nitrógeno**, las unidades de concentración son ppb.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	47	114	15	1	10	10	6	8	12	18	28
	Camarones	CAM	96	383	41	2	39	33	12	17	28	50	86
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	92	211	23	0	18	18	8	11	17	29	43
	Cuajimalpa	CUA	50	206	21	2	21	15	7	10	15	25	42
	Hospital General de México	HGM	55	247	29	4	23	23	10	14	22	37	57
	Iztacalco	IZT	57	279	33	5	28	25	12	16	24	41	66
	Merced	MER	90	334	44	3	36	34	14	20	33	54	87
	Miguel Hidalgo	MGH	82	420	39	4	38	28	12	17	26	45	81
	Pedregal	PED	95	193	20	0	16	16	6	9	15	25	39
	Santiago Acahualtepec	SAC	92	315	29	1	32	23	8	11	19	34	63
	Santa Fe	SFE	94	180	22	1	18	16	7	11	16	27	44
	Tláhuac	TAH	94	165	17	1	14	14	5	8	13	22	34
	UAM Xochimilco	UAX	90	251	24	1	20	20	7	10	18	30	47
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	250	31	2	26	27	9	13	24	40	63
Estado de México	Acolman	ACO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Atizapán	ATI	91	208	24	1	23	18	7	10	16	28	50
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	86	321	35	2	39	33	7	10	20	43	84
	FES Acatlán	FAC	95	250	32	0	32	25	8	13	21	38	71
	FES Aragón	FAR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	27	509	48	5	48	40	12	18	31	58	107
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	80	361	25	1	32	20	4	7	13	27	60
	Nezahualcóyotl	NEZ	95	342	29	3	26	22	9	13	21	35	56
	San Agustín	SAG	87	281	32	2	30	25	10	14	22	39	68
	Tlalnepantla	TLA	92	350	44	3	35	30	16	22	32	52	86
	Tultitlán	TLI	21	352	44	5	43	38	12	17	30	55	99
	Villa de las Flores	VIF	94	254	27	1	29	25	6	9	16	34	63
	Xalostoc	XAL	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.6. Estadísticas básicas para **óxido nítrico**, las unidades de concentración son ppb.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	47	60	2	0	4	2	0	0	1	2	7
	Camarones	CAM	96	322	16	0	30	14	1	1	4	15	45
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	92	175	6	0	11	4	0	1	2	5	15
	Cuajimalpa	CUA	50	162	6	0	13	3	1	1	2	4	13
	Hospital General de México	HGM	55	190	8	0	15	8	0	1	2	9	22
	Iztacalco	IZT	57	227	10	0	19	8	1	1	3	9	26
	Merced	MER	90	272	16	0	27	15	1	2	5	17	46
	Miguel Hidalgo	MGH	82	374	16	0	31	12	1	2	5	14	42
	Pedregal	PED	95	149	3	0	9	3	0	0	0	3	9
	Santiago Acahualtepec	SAC	92	270	10	0	23	6	0	1	2	7	27
	Santa Fe	SFE	94	157	5	0	11	4	0	1	2	5	15
	Tláhuac	TAH	94	139	5	0	8	2	1	2	2	4	11
	UAM Xochimilco	UAX	90	207	6	0	13	4	0	1	1	5	17
	UAM Iztapalapa	UIZ	95	214	9	0	18	8	0	1	2	9	27
Estado de México	Acolman	ACO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Atizapán	ATI	91	173	7	0	16	5	0	0	1	5	20
	Chalco	CHO	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	86	278	17	0	34	16	0	1	2	17	56
	FES Acatlán	FAC	95	213	12	0	24	10	0	1	3	11	35
	FEA Aragón	FAR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Los Laureles	LLA	27	456	23	0	42	21	1	2	6	23	68
	La Presa	LPR	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Montecillo	MON	80	322	11	0	27	6	0	1	1	7	36
	Nezahualcóyotl	NEZ	95	277	9	0	19	6	1	1	2	7	23
	San Agustín	SAG	87	249	13	0	24	9	1	2	3	11	35
	Tlalnepantla	TLA	92	300	17	0	27	15	1	3	7	18	45
	Tultitlán	TLI	21	283	19	0	33	17	1	2	4	19	58
	Villa de las Flores	VIF	94	227	10	0	21	7	0	1	2	8	32
	Xalostoc	XAL	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.7. Estadísticas básicas para las **muestras de partículas suspendidas totales**, las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Merced	MER	Alto volumen	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	Alto volumen	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	Alto volumen	51	135	81	18	34	48	34	60	86	108	124
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	Alto volumen	67	163	86	26	31	44	45	63	81	107	128
	Xalostoc	XAL	Alto volumen	21	195	156	107	29	38	111	136	166	174	182

Tabla A.IV.8. Estadísticas básicas para las **PM_{10}** del monitoreo **manual**, método de referencia (FRM de U.S. EPA), las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura. Para la evaluación de la NOM, sólo se utilizaron las estaciones con ≥ 75% de muestreos válidos y con suficiencia trimestral ≥ 3.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO NOM			
				% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Suficiencia trimestral	Máximo promedio 24 h (75 µg/m³)	Promedio anual (40 µg/m³)	Cumple
Ciudad de México	Lomas	LOM	FRM 16.67 lpm	29	56	37	20	12	16	22	31	37	47	51	1	56	37	Inválido
	Merced	MER	FRM Alto Volumen	91	82	43	11	18	26	19	31	38	57	68	3	82	42	No
	Pedregal	PED	FRM 16.67 lpm	87	56	29	9	14	22	14	19	28	41	49	3	56	30	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	FRM Alto Volumen	78	67	40	8	16	23	19	32	40	54	60	2	67	38	Inválido
Estado de México	La Presa	LPR	FRM Alto Volumen	91	113	50	8	25	36	19	34	45	70	81	3	113	50	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	FRM Alto Volumen	29	64	51	38	8	13	40	45	52	58	59	1	65	51	Inválido
	Tlalnepantla	TLA	FRM Alto Volumen	93	76	34	10	17	22	17	21	30	44	62	3	76	35	No
	Xalostoc	XAL	FRM Alto Volumen	27	104	74	43	19	22	55	60	75	82	102	1	104	74	Inválido

Tabla A.IV.9. Estadísticas básicas de la concentración **horaria de PM_{10}** reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades son µg/m^3 calculadas a condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	TEOM (30°C)	0	29	29	29	-	0	29	29	29	29	29
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	88	146	33	1	17	23	13	20	31	43	56
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	75	253	36	1	20	24	14	22	32	46	61
	Cuajimalpa	CUA	BETA (35°C)	41	244	38	1	21	25	15	24	36	49	65
	Gustavo A. Madero	GAM	BETA (35°C)	54	219	42	2	22	30	15	25	39	55	72
	H. Gral. de México	HGM	TEOM (30°C)	0	51	51	51	-	0	51	51	51	51	51
	Iztacalco	IZT	BETA (35°C)	59	148	34	1	17	22	14	22	32	44	56
	Merced	MER	TEOM (30°C)	78	219	45	2	22	29	19	29	42	58	74
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	92	210	30	1	17	23	11	17	27	40	53
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	96	288	29	1	17	21	11	17	25	38	51
	Tláhuac	TAH	TEOM (35°C)	47	519	52	1	31	34	20	31	46	65	87
	UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	88	219	41	3	22	28	16	25	38	53	69
Estado de México	Acolman	ACO	BETA (35°C)	43	311	39	1	28	33	11	19	31	52	74
	Atizapán	ATI	TEOM (35°C)	92	598	34	1	25	27	11	18	30	45	63
	Chalco	CHO	TEOM (35°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	TEOM (35°C)	84	387	48	1	34	37	14	25	40	62	92
	FES Acatlán	FAC	TEOM (35°C)	84	392	32	1	23	27	9	16	27	43	61
	I. Invest. Nucleares	INN	TEOM (30°C)	94	168	22	1	14	18	7	11	19	29	39
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	82	404	50	2	27	34	21	31	46	65	85
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	77	231	45	1	23	28	20	28	41	56	74
	Tultitlán	TLI	TEOM (35°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Villa de las Flores	VIF	TEOM (35°C)	86	615	50	1	42	41	13	24	40	65	98
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.10. Estadísticas básicas para las **$PM_{2.5}$** del monitoreo **manual**, método de referencia (FRM de U.S. EPA), las unidades de concentración son µg/m³ calculadas a condiciones locales de presión y temperatura. Para la evaluación de la NOM, sólo se utilizaron las estaciones con ≥ 75% muestreos válidos y con suficiencia trimestral ≥ 3.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO NOM			
				% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Suficiencia trimestral	Máximo promedio 24 h (45 µg/m³)	Promedio anual (12 µg/m³)	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	FRM 16.67 lpm	93	33	19	5	8	11	9	13	17	24	30	3	33	18	No
	Pedregal	PED	FRM 16.67 lpm	95	26	13	4	5	9	6	8	13	17	20	3	26	13	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	FRM 16.67 lpm	84	33	17	4	7	8	8	12	15	20	28	3	33	17	No
Estado de México	San Agustín	SAG	FRM 16.67 lpm	79	33	16	3	8	12	6	10	15	22	25	2	32	15	Inválido
	Tlalnepantla	TLA	FRM 16.67 lpm	93	32	19	8	7	11	10	13	18	24	30	3	32	19	No
	Xalostoc	XAL	FRM 16.67 lpm	30	44	27	14	9	14	15	20	28	34	36	1	44	27	Inválido

Tabla A.IV.11. Estadísticas básicas de la concentración **horaria de $PM_{2.5}$** reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades son µg/m³ a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de equipo continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	TEOM (30°C)	0	16	16	16	-	0	16	16	16	16	16
	Ajusco	AJU	BETA (35°C)	46	158	18	1	13	14	5	10	16	24	33
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	88	87	18	1	11	14	6	10	16	24	32
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	75	121	19	1	11	14	7	11	18	25	33
	C. Ciencias Atmósf.	CCA	BETA (35°C)	86	87	17	1	10	12	6	11	16	23	30
	Gustavo A. Madero	GAM	TEOM-FDMS (30°C)	54	93	19	1	12	15	6	11	17	26	35
	H. Gral. de México	HGM	TEOM (30°C)	0	32	32	32	-	0	32	32	32	32	32
	Merced	MER	TEOM (30°C)	78	102	22	1	13	17	7	13	21	30	39
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	92	120	18	1	11	13	6	10	16	23	32
	S. Acahualtepec	SAC	TEOM (30°C)	87	110	24	1	14	19	8	13	21	32	43
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	96	75	16	1	10	12	5	9	14	21	29
	UAM Xochimilco	UAX	BETA (35°C)	95	114	18	1	11	13	6	11	17	24	31
	UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	88	189	20	1	12	16	7	11	18	27	36
Estado de México	FES Aragón	FAR	TEOM (30°C)	96	117	18	1	10	13	6	10	16	23	31
	I. Invest. Nucleares	INN	TEOM (30°C)	94	77	13	1	8	10	4	7	11	17	24
	Montecillo	MON	TEOM (30°C)	31	113	17	1	10	12	6	10	15	22	29
	Nezahualcóyotl	NEZ	BETA (35°C)	75	151	23	1	14	17	8	13	21	30	40
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	82	126	22	1	13	17	7	12	20	29	39
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	77	105	22	1	13	16	7	13	20	29	38
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

-

Tabla A.IV.12. Estadísticas de la concentración **horaria de PMcoarse** reportada por los equipos de monitoreo continuo, las unidades son µg/m^3 calculadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	TEOM (30°C)	0	13	13	13	-	0	13	13	13	13	13
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	88	125	15	1	11	12	4	7	12	19	29
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	75	240	16	1	14	15	4	7	13	22	33
	Gustavo A. Madero	GAM	TEOM (30°C)	54	199	22	1	15	18	6	12	20	30	41
	H. Gral. de México	HGM	TEOM (30°C)	**0**	18	18	18	-	0	18	18	18	18	18
	Merced	MER	TEOM (30°C)	78	184	23	1	14	16	8	13	20	29	40
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	92	182	13	1	10	11	3	6	10	17	24
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	96	251	13	1	10	10	4	7	11	17	24
	UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	88	196	20	1	14	16	6	11	17	27	37
Estado de México	I. Invest. Nucleares	INN	TEOM (30°C)	94	135	9	1	8	9	2	3	6	12	19
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	82	369	29	1	19	20	10	16	25	36	51
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	77	204	23	1	16	16	8	13	19	29	42
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.13. Estadísticas básicas para **temperatura** ambiente, todas las unidades están en °C.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	55	27	16	3	4	7	10	12	15	19	22
	Ajusco	AJU	61	24	10	-5	6	9	2	6	10	14	18
	Benito Juárez	BJU	99	30	18	6	4	6	13	15	18	21	24
	Cuajimalpa	CUA	54	26	16	4	4	6	11	13	15	19	22
	Gustavo A. Madero	GAM	92	31	19	5	5	6	13	16	18	22	25
	Hospital General de México	HGM	61	30	17	6	4	6	12	15	17	20	24
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	91	30	18	5	5	7	12	15	17	21	25
	Merced	MER	98	31	19	6	4	6	13	16	18	22	25
	Miguel Hidalgo	MGH	69	31	19	6	4	6	14	16	18	22	25
	Milpa Alta	MPA	77	27	15	3	4	6	10	12	15	18	21
	Pedregal	PED	99	30	17	5	4	6	12	14	17	20	23
	Santa Fe	SFE	100	27	15	4	4	6	10	13	15	18	21
	Tláhuac	TAH	99	32	18	5	5	7	12	14	17	21	24
	UAM Xochimilco	UAX	98	30	17	4	5	7	11	14	17	21	24
	UAM Iztapalapa	UIZ	97	32	19	6	4	6	14	17	19	23	26
Estado de México	Acolman	ACO	70	29	16	1	5	8	9	12	15	20	23
	Chalco	CHO	59	30	18	2	5	8	11	14	17	22	25
	Cuautitlán	CUT	100	32	16	-2	6	9	8	12	16	21	25
	FES Acatlán	FAC	100	33	18	1	6	10	10	13	17	23	26
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	100	26	12	-1	5	8	5	8	11	16	19
	Montecillo	MON	85	30	17	1	6	8	10	14	17	22	25
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	29	17	4	4	6	11	14	17	20	23
	San Agustín	SAG	93	31	19	5	5	6	13	16	19	22	26
	Tlalnepantla	TLA	98	31	18	4	5	7	12	15	17	21	24
	Villa de las Flores	VIF	100	31	18	3	5	7	11	14	17	21	25
	Xalostoc	XAL	95	30	18	5	4	6	13	15	18	21	24

Tabla A.IV.14. Estadísticas básicas para **humedad relativa**, todas las unidades están en %.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	56	100	50	2	21	33	24	33	47	66	80
	Ajusco	AJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Benito Juárez	BJU	99	90	49	2	19	31	23	34	50	65	75
	Cuajimalpa	CUA	54	91	49	2	19	30	24	34	48	64	75
	Gustavo A. Madero	GAM	85	96	53	6	19	32	26	37	54	69	78
	Hospital General de México	HGM	61	85	45	5	18	29	21	31	45	60	70
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	84	100	56	8	21	34	29	40	57	74	83
	Merced	MER	98	92	49	2	19	31	23	34	50	65	74
	Miguel Hidalgo	MGH	99	87	45	1	20	32	19	30	45	62	73
	Milpa Alta	MPA	77	90	53	1	19	30	27	38	54	68	77
	Pedregal	PED	99	91	51	1	20	31	25	35	50	66	77
	Santa Fe	SFE	100	93	56	2	20	34	29	40	58	74	82
	Tláhuac	TAH	99	87	49	1	19	30	22	34	50	64	74
	UAM Xochimilco	UAX	98	96	53	3	20	31	25	37	54	68	78
	UAM Iztapalapa	UIZ	78	95	55	3	20	31	27	40	57	71	80
Estado de México	Acolman	ACO	32	92	52	3	21	36	23	35	54	71	80
	Chalco	CHO	59	89	50	7	19	31	25	34	50	65	76
	Cuautitlán	CUT	100	96	61	2	25	44	26	40	65	84	91
	FES Acatlán	FAC	100	93	52	1	23	39	21	33	54	72	82
	I. de Investigaciones Nucleares	INN	100	95	66	5	22	37	33	49	71	86	90
	Montecillo	MON	85	92	56	5	21	35	26	39	58	74	82
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	88	48	3	18	29	23	34	49	63	72
	San Agustín	SAG	93	100	55	9	20	33	28	39	57	72	82
	Tlalnepantla	TLA	98	85	47	5	19	32	21	31	46	63	72
	Villa de las Flores	VIF	99	100	52	4	21	35	23	35	53	70	79
	Xalostoc	XAL	95	84	46	5	18	28	21	32	46	60	69

Tabla A.IV.15. Estadísticas básicas para **velocidad de viento**, todas las unidades están en m/s.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											% de calmas	Dirección del viento dominante
			% de datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90		
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	100	15	3	0	2	2	1	2	3	4	5	0.4	NO
	Ajusco	AJU	61	12	3	0	1	2	1	2	2	3	4	0.3	S
	Benito Juárez	BJU	99	7	2	0	1	1	1	1	2	2	3	0.1	NNE
	Cuajimalpa	CUA	30	7	2	0	1	1	1	2	2	3	3	0	O
	Gustavo A. Madero	GAM	83	8	2	0	1	1	1	1	2	3	4	1.6	ENE
	H. Gral. de México	HGM	61	10	2	0	1	2	1	1	2	3	4	0	N
	Laboratorio Análisis	LAA	81	8	2	0	1	1	1	1	2	3	3	0.6	NNO
	Merced	MER	98	7	2	0	1	1	1	1	2	3	4	0	NNE
	Miguel Hidalgo	MGH	74	7	2	0	1	1	1	1	2	3	3	0	SO
	Milpa Alta	MPA	76	11	3	0	1	2	1	2	3	4	5	0	SO
	Pedregal	PED	99	7	2	0	1	1	1	1	2	2	3	0.1	NO
	S. Acahualtepec	SAC	100	11	2	0	1	2	1	1	2	3	4	2.4	NE
	Santa Fe	SFE	85	7	2	0	1	1	1	2	2	3	4	0	ONO
	Tláhuac	TAH	99	8	2	0	1	2	1	1	2	3	4	0.2	NO
	UAM Xochimilco	UAX	98	8	2	0	1	1	1	1	2	3	4	0.1	ESE
	UAM Iztapalapa	UIZ	98	8	2	0	1	1	1	1	2	3	4	0	NNE
Estado de México	Acolman	ACO	67	10	3	0	2	2	1	2	2	4	5	0	NO
	Chalco	CHO	59	8	2	0	1	2	1	1	2	3	4	0.3	SE
	Cuautitlán	CUT	100	8	2	0	1	2	1	1	2	2	3	1	NO
	FES Acatlán	FAC	100	6	2	0	1	1	1	1	2	2	3	0.1	NO
	FES Aragón	FAR	99	10	3	0	1	2	1	2	2	3	5	0	ENE
	I. Invest. Nucleares	INN	100	8	2	0	1	2	1	1	1	2	3	1.1	ESE
	Montecillo	MON	87	10	2	0	2	2	0	1	2	3	5	4.8	NNO
	Nezahualcóyotl	NEZ	97	9	3	0	1	2	1	2	2	3	5	0	NE
	San Agustín	SAG	92	7	2	0	1	1	1	1	2	2	3	1.3	NNE
	Tlalnepantla	TLA	98	8	3	0	1	2	1	2	2	3	4	0	NNO
	Villa de las Flores	VIF	100	8	2	1	1	1	1	2	2	3	4	0	N
	Xalostoc	XAL	95	13	3	0	2	3	1	2	3	4	6	0	N

* La dirección predominante corresponde al vector resultante de la suma vectorial de los datos horarios, de donde viene el viento.

Tabla A.IV.16. Estadísticas básicas para radiación solar **ultravioleta A**, todas las unidades están en W/m^2.

Entidad	Estación	Clave	% datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Laboratorio Análisis	LAA	100	5	1	0	1	2	0	0	0	2	4
	Merced	MER	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	99	6	1	0	2	2	0	0	0	2	4
	Santa Fe	SFE	100	6	1	0	2	2	0	0	0	2	4
Estado de México	Chalco	CHO	64	5	1	0	1	2	0	0	0	2	4
	Cuautitlán	CUT	100	6	1	0	2	3	0	0	0	3	4
	FES Acatlán	FAC	98	6	1	0	2	2	0	0	0	2	4
	Montecillo	MON	86	6	1	0	2	2	0	0	0	2	4
	San Agustín	SAG	79	6	1	0	2	2	0	0	0	2	4
	Tlalnepantla	TLA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.17. Estadísticas básicas para radiación solar **ultravioleta B**, todas las unidades están en W/m^2.

Entidad	Estación	Clave	% datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Laboratorio Análisis	LAA	100	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Merced	MER	98	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Milpa Alta	MPA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	99	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Santa Fe	SFE	100	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estado de México	Chalco	CHO	64	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cuautitlán	CUT	100	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	FES Acatlán	FAC	98	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Montecillo	MON	86	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	San Agustín	SAG	79	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tlalnepantla	TLA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.18. Estadísticas básicas para **depósito atmosférico** húmedo.

Entidad	Estación	Clave	PP	pH			ANIONES			CATIONES					
			Precipitación total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje eventos de lluvia ácida (%)	NO_3^- depósito total (kg/ha)	SO_4^{-2} depósito total (kg/ha)	Cl^- depósito total (kg/ha)	NH_4^+ depósito Total (kg/ha)	Ca^{2+} depósito Total (kg/ha)	K^+ depósito Total (kg/ha)	H^+ depósito Total (kg/ha)	Mg^{2+} depósito Total (kg/ha)	Na^+ depósito Total (kg/ha)
Ciudad de México	Ajusco	AJU	721	4.3	5.8	33	10.5	14.5	3	7.8	3.2	0.5	0.04	0.2	0.3
	Cerro del Tepeyac	TEC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Corena	COR	306	4.1	6.4	14	6.6	7.8	2	5.5	2.5	0.2	0.02	0.2	0.2
	Diconsa	DIC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	647	4.3	6.0	36	11.5	15.2	2.8	9.5	4.3	0.2	0.02	0.3	0.3
	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	772	4.4	5.9	36	13.2	18	2.6	9	4.5	0.3	0.06	0.3	0.2
	Laboratorio de Análisis	LAA	358	4.7	6.7	12	5.9	7.8	1.4	4.8	4	0.3	0.01	0.1	0.3
	Legaria	IBM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Lomas	LOM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Museo de la Ciudad de México	MCM	318	4.5	6.4	11	5.5	7.7	1.7	5.7	2.8	0.3	0.01	0.2	0.2
	San Nicolás Totolapan	SNT	693	4.1	5.8	47	12.5	16.9	2.9	8.9	4.1	0.9	0.03	0.3	0.3
Estado de México	Montecillo	MON	221	6.5	6.9	0	4.1	4	0.8	3.1	2.7	0.2	0	0.2	0.2
	Nezahualcóyotl Sur	NEZ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Tlalnepantla	TLA	356	4.7	6.5	15	10	13	1.9	7.6	6.1	-0.5	0.01	0.3	0.5
	Xalostoc	XAL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.19. Conteo de **días limpios y sucios**. Se considera como día "**limpio**" cuando la concentración del contaminante es menor o igual al valor límite de su NOM.

Entidad	Estación	Clave	Ozono				PM_{10}		$PM_{2.5}$		Total por estación**	
			Días sucios NOM 1h	Días limpios NOM 1h	Días sucios NOM 8h	Días limpios NOM 8h	Días sucios	Días limpios	Días sucios	Días limpios	SUCIOS	LIMPIOS
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	53	55	71	39	—	—	—	—	**184**	**—**
	Ajusco	AJU	28	176	53	152	—	—	2	165	**204**	**—**
	Benito Juárez	BJU	50	306	73	283	—	321	1	320	**140**	**224**
	Camarones	CAM	89	273	92	271	—	275	—	275	**196**	**170**
	C. Ciencias Atmósf.	CCA	134	227	157	206	—	—	1	311	**365**	**—**
	Cuajimalpa	CUA	65	128	87	110	2	148	—	—	**197**	**—**
	Gustavo A. Madero	GAM	80	231	101	210	3	194	—	197	**311**	**—**
	H. Gral. de México	HGM	83	129	97	116	—	—	—	—	**212**	**—**
	Iztacalco	IZT	72	148	79	141	—	218	—	—	**220**	**—**
	Merced	MER	84	275	85	274	9	280	3	286	**190**	**170**
	Miguel Hidalgo	MGH	101	236	116	221	—	—	—	—	**337**	**—**
	Milpa Alta	MPA	58	187	93	152	—	—	—	—	**245**	**—**
	Pedregal	PED	129	235	147	218	—	342	3	339	**221**	**144**
	S. Acahualtepec	SAC	75	270	110	236	—	—	7	315	**364**	**—**
	Santa Fe	SFE	113	230	128	216	1	351	1	351	**217**	**148**
	Tláhuac	TAH	86	280	129	236	8	162	—	—	**366**	**—**
	UAM Xochimilco	UAX	124	238	149	215	—	—	1	351	**363**	**—**
	UAM Iztapalapa	UIZ	112	250	133	230	1	324	3	322	**194**	**169**
Estado de México	Acolman	ACO	—	—	—	—	7	153	—	—	**160**	**—**
	Atizapán	ATI	15	339	18	337	1	342	—	—	**354**	**—**
	Chalco	CHO	42	—	—	—	—	—	—	—	**—**	**—**
	Cuautitlán	CUT	23	293	33	283	21	290	—	—	**329**	**—**
	FES Acatlán	FAC	40	321	50	313	—	310	—	—	**366**	**—**
	FES Aragón	FAR	68	286	101	254	—	—	—	354	**366**	**—**
	Invest. Nucleares	INN	21	345	36	330	—	341	—	341	**366**	**—**
	Los Laureles	LLA	3	238	10	232	—	—	—	—	**241**	**—**
	La Presa	LPR	13	215	19	210	—	—	—	—	**229**	**—**
	Montecillo	MON	16	293	33	277	—	—	—	114	**310**	**—**
	Nezahualcóyotl	NEZ	—	322	79	285	—	—	6	270	**364**	**—**
	San Agustín	SAG	12	321	15	319	24	277	—	301	**200**	**133**
	Tlalnepantla	TLA	30	333	36	327	5	280	2	283	**144**	**220**
	Tultitlán	TLI	12	69	13	68	—	—	—	—	**81**	**—**
	Villa de las Flores	VIF	29	327	59	297	50	270	—	—	**366**	**—**
	Xalostoc	XAL	—	—	—	1	—	—	—	—	**—**	**—**
Total	**Ciudad de México***		**206**	**160**	**212**	**154**	**19**	**347**	**10**	**356**	**238**	**128**
	Estado de México *		**108**	**258**	**133**	**233**	**62**	**304**	**6**	**360**	**196**	**170**
	ZMCM *		**214**	**152**	**219**	**147**	**68**	**298**	**11**	**355**	**262**	**105**

* Considerando todas las estaciones de monitoreo.

** Considerando todos los contaminantes (O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, CO). La tabla A.IV.19 y su continuación se complementan.

Tabla A.IV.19. (Continuación) Conteo de **días limpios y sucios**. Se considera como día "**limpio**" cuando la concentración del contaminante es menor o igual al valor límite de su NOM.

Entidad	Estación	Clave	SO_2				NO_2		CO			
			Días sucios NOM 1h	Días limpios NOM 1h	Días sucios NOM 24 h	Días limpios NOM 24 h	Días sucios NOM 1h	Días limpios NOM 1 h	Días sucios NOM 1h	Días limpios NOM 1h	Días sucios NOM 8 h	Días limpios NOM 8 h
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	—	192	—	191	—	179	—	193	—	195
	Ajusco	AJU	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Benito Juárez	BJU	—	360	—	355	—	364	—	357	—	359
	Camarones	CAM	7	358	—	361	—	364	—	364	—	364
	C. Ciencias Atmósf.	CCA	—	363	—	359	—	352	—	269	—	269
	Cuajimalpa	CUA	—	190	—	185	—	194	—	193	—	196
	Gustavo A. Madero	GAM	—	—	—	—	—	311	—	—	—	—
	H. Gral. de México	HGM	—	189	—	188	—	212	—	212	—	213
	Iztacalco	IZT	2	218	—	213	—	220	—	214	—	214
	Merced	MER	2	357	—	349	—	344	—	349	—	350
	Miguel Hidalgo	MGH	—	330	—	327	—	313	—	330	—	330
	Milpa Alta	MPA	—	244	—	237	—	245	—	232	—	234
	Pedregal	PED	1	347	—	339	—	365	—	350	—	350
	S. Acahualtepec	SAC	1	237	—	232	—	350	—	303	—	304
	Santa Fe	SFE	1	342	—	334	—	363	—	322	—	323
	Tláhuac	TAH	—	355	—	345	—	365	—	364	—	364
	UAM Xochimilco	UAX	—	317	—	315	—	343	—	357	—	358
	UAM Iztapalapa	UIZ	1	360	—	351	—	363	—	362	—	363
Estado de México	Acolman	ACO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Atizapán	ATI	5	347	-	348	—	346	—	334	—	335
	Chalco	CHO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	330
	Cuautitlán	CUT	5	321	—	320	—	328	—	—	—	—
	FES Acatlán	FAC	5	360	—	360	—	362	—	365	—	366
	FES Aragón	FAR	—	363	—	355	—	364	—	352	—	352
	Invest. Nucleares	INN	—	364	—	349	—	—	—	366	—	366
	Los Laureles	LLA	—	222	—	218	—	102	—	241	—	242
	La Presa	LPR	—	205	—	200	—	—	—	225	—	227
	Montecillo	MON	—	304	—	293	—	309	—	266	—	267
	Nezahualcóyotl	NEZ	4	351	—	349	—	364	—	347	—	347
	San Agustín	SAG	1	187	—	184	—	334	—	330	—	—
	Tlalnepantla	TLA	12	344	—	351	—	352	—	352	—	353
	Tultitlán	TLI	6	75	—	79	—	81	—	81	—	81
	Villa de las Flores	VIF	31	322	—	346	—	360	—	360	—	360
	Xalostoc	XAL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	**Ciudad de México***		**11**	**355**	**—**	**366**	**0**	**366**	**0**	**366**	**—**	**365**
	Estado de México *		**43**	**323**	**—**	**366**	**0**	**366**	**0**	**366**	**—**	**365**
	ZMCM *		**45**	**321**	**—**	**366**	**0**	**366**	**0**	**366**	**—**	**366**

* Considerando todas las estaciones de monitoreo.

INFORME ANUAL
2020

ANEXO 5

Programa de contingencias ambientales atmosféricas

Tabla A.V.1. Activación de Fase de Pre contingencia a partir de 2001 (derogada en 2016).

Año	Contaminante	Activación			Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2001	Ozono	13-ene 15:00	TPN	209	13-ene 18:00	3 h
	Ozono	17-ene 15:00	AZC	220	17-ene 19:00	4 h
	Ozono	29-ene 15:00	AZC	231	29-ene 18:00	3 h
	Ozono	13-feb 16:00	AZC	208	13-feb 18:00	2 h
	Ozono	07-mar 14:00	CUA	201	07-mar 17:00	3 h
	Ozono	02-may 14:00	BJU	219	02-may 16:00	2 h
	Ozono	02-may 14:00	PLA	214	02-may 16:00	2 h
	Ozono	24-may 15:00	BJU	205	24-may 17:00	2 h
	Ozono	28-may 16:00	CUA	213	28-may 18:00	2 h
	Ozono	07-jun 15:00	TAC	209	07-jun 16:00	1 h
	Ozono	07-jun 16:00	PLA	213	07-jun 18:00	2 h
	Ozono	21-jul 15:00	CUA	206	21-jul 18:00	3 h
	Ozono	04-ago 15:00	SUR	203	04-ago 17:00	2 h
	Ozono	18-ago 15:00	SUR	209	18-ago 17:00	2 h
2002	Ozono	16-ene 15:00	PED	219	16-ene 18:00	3 h
	Ozono	15-feb 16:00	PED	209	15-feb 18:00	2 h
	Ozono	15-mar 17:00	TAC	204	15-mar 18:00	1 h
	Ozono	02-abr 14:00	PLA	208	02-abr 16:00	2 h
	Ozono	20-abr 16:00	PLA	207	20-abr 18:00	2 h
	Ozono	22-abr 15:00	AZC	202	22-abr 17:00	2 h
	Ozono	22-abr 16:00	PED	210	22-abr 17:00	1 h
	Ozono	18-sep 15:00	PED	232	18-sep 18:00	Se activó Fase I
	Ozono	23-oct 15:00	PED	202	23-oct 17:00	2 h
	Ozono	21-dic 17:00	EAC	212	21-dic 18:00	1 h
2003	PM_{10}	01-ene 11:00	XAL	161	01-ene 00:00	13 h
	Ozono	03-abr 15:00	AZC	209	03-abr 15:00	59 min
	Ozono	10-may 15:00	SUR	204	10-may 15:00	59 min
2004	PM_{10}	25-dic 09:00	XAL	164	25-dic 12:00	Se activó Fase I
2005	—	—	—	—	—	—
2006	PM_{10}	01-ene 09:00	VIF	169	02-ene 03:00	18 h
	PM_{10}	16-mar 19:00	SAG	167	17-mar 17:00	22 h
2007	Ozono	14-abr 16:00	PED	185	16-abr 16:00	48 h
	Ozono	23-jun 15:00	COY	172	24-jun 15:00	24 h
	Ozono	27-jul 16:00	TPN	184	28-jul 16:00	24 h
2008	Ozono	08-abr 16:00	EAC	172	09-abr 16:00	24 h
	Ozono	10-may 17:00	COY	172	11-may 17:00	24 h

Tabla A.V.1. (continuación) Activación de Fase de Pre contingencia a partir de 2001 (derogada en 2016).

Año	Contaminante	Activación			Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2009	Ozono	13-feb 17:00	PED	180	16-feb 17:00	72 h
	PM_{10}	03-nov 22:00	XAL	164	05-nov 09:00	48 h
2010	Ozono	03-may 16:00	EAC	168	05-may 16:00	48 h
	Ozono	31-may 17:00	EAC	172	02-jun 17:00	48 h
	Ozono	04-jun 17:00	UIZ	165	05-jun 17:00	24 h
2011	PM_{10}	11-ene 21:00	XAL	156	12-ene 17:00	20 h
	Ozono	26-mar 16:00	COY	160	27-mar 16:00	24 h
	Ozono	12-may 16:00	PED	161	14-may 16:00	48 h
	Ozono	16-jun 16:00	COY	161	17-jun 16:00	24 h
	Ozono	13-nov 16:00	FAC	156	14-nov 16:00	24 h
2012	Ozono	02-mar 16:00	FAC	153	04-mar 16:00	48 h
	Ozono	11-nov 16:00	PED	159	12-nov 15:00	23 h
	PM_{10}	25-dic 11:00	VIF	152	26-dic 10:00	23 h
2013	PM_{10}	01-ene 10:00	VIF	158	02-ene 10:00	24 h
	Ozono	22-abr 17:00	NEZ	164	23-abr 20:00	27 h
	Ozono	27-abr 15:00	MER	159	27-abr 20:00	29 h
	Ozono	02-may 17:00	PED	157	03-may 20:00	27 h
	Ozono	09-may 17:00	IZT	158	11-may 20:00	51 h
	Ozono	21-may 16:00	UAX	151	22-may 20:00	28 h
2014	Ozono	20-feb 17:00	FAC	159	21-feb 20:00	27 h
	Ozono	20-mar 16:00	CUA	160	21-mar 20:00	28 h
	Ozono	09-may 16:00	SUR	156	10-may 20:00	28 h
2015	Ozono	03 mar 17:00	CUA	155	04 mar 20:00	27 h
	Ozono	08 abr 17:00	SFE	159	10 abr 19:00	50 h
	Ozono	05 may 16:00	IZT	157	06 may 18:00	26 h
	Ozono	09 may 17:00	PED	161	10 may 20:00	27 h
	Ozono	10 jun 16:00	COY	152	12 jun 17:00	49 h
	Ozono	04 oct 16:00	FAC	170	05 oct 17:00	25 h
	PM_{10}	25 dic 08:00	VIF	151	26 dic 12:00	28 h
2016*	Ozono	19 feb 16:00	CHO	157	20 feb 17:00	25 h
	Ozono	21 feb 15:00	GAM	155	22 feb 20:00	29 h
	Ozono	12 mar 17:00	GAM	159	14 mar 16:00	Pasó aFase I
	Ozono	04 abr 18:00	BJU	155	05 abr 17:00	Pasó a Fase I

A partir del 6 de abril de 2016 las autoridades Federales decidieron reducir el umbral de activación de la Fase I y se dejó como límite de 155 ppb que correspondía al valor de Pre contingencia, por esto desaparece la Fase de Pre contingencia del PCAA.

Tabla A.V.2. Activación de Fases de Contingencia I, II, Regional y Extraordinaria entre 2001 y 2020.

Año	Contaminante	Activación				Desactivación	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fase	Fecha y hora	Duración
2001	—	—	—	—	—	—	—
2002	Ozono	18-sep 16:00	PED	242	Fase I	19 sep 16:00	24 h
2003	PM_{10}	25 dic 12:00	XAL	176	Fase I	26 dic 12:00	24 h
2004	_	—	—	—	—	—	—
2005	PM_{10}	01 ene 08:00	VIF	181	Regional	02 ene 08:00	24 h
2006	—	—	—	—	—	—	—
2007	—	—	—	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	—	—
2009	—	—	—	—	—	—	—
2010	—	—	—	—	—	—	—
2011	—	—	—	—	—	—	—
2012	—	—	—	—	—	—	—
2013	—	—	—	—	—	—	—
2014	—	—	—	—	—	—	—
2015	—	—	—	—	—	—	—
2016	Ozono	14 mar 16:00	CUA	194	Fase I	17 mar 16:00	72 h
	Ozono	05 abr 17:00	AJM	156	Fase I*	06 abr 17:00	24 h
	Ozono	02 may 15:00	BJU	161	Fase I*	05 may 17:00	74 h
	Ozono	14 may 17:00	TAH	157	Fase I*	15 may 15:00	22h
	Ozono	20 may 15:00	SFE	178	Fase I*	21 may 17:00	26 h
	Ozono	24 may 15:00	CAM	151	Fase I*	24 may 21:00	06 h
	Ozono	27 may 15:00	GAM	165	Fase I*	28 may 18:00	27 h
	Ozono	31 may 16:00	MGH	155	Fase I*	01 jun 18:00	26 h
	Ozono	08 jul 17:00	SFE	152	Fase I*	09 jun 15:00	22 h
	Ozono	11 ago 16:00	AJM	151	Fase I*	12 ago 17:00	25 h
2017	PM_{10}	06 ene 09:00	XAL	153	F1 Regional	07 ene 09:00	24 h
	Ozono	15 may 16:00	AJM	151	Fase I*	21 may 19:00	147 h
	Ozono	22 may 15:00	GAM	162	Fase I*	24 may 18:00	51 h
	PM_{10}	14 dic 11:00	SAG	154	F1 Regional	15 dic 09:00	22 h
2018	Ozono	06 jun 16:00	PED	161	Fase I*	07 jun 16:00	24 h
	PM_{10}	25 dic 11:00	VIF	152	F1 Regional	26 dic 10:00	23 h
2019	PM_{10}	01 ene 09:00	VIF	157	F1 Regional	02 ene 10:00	25 h
	Ozono	30 mar 15:00	PED	155	Fase I	31 mar 15:00	24 h
	Ozono	10 abr 17:00	PED	152	Fase I	11 abr 15:00	22 h
	Ozono	16 abr 17:00	CAM	154	Fase I	18 abr 15:00	46 h
	$PM_{2.5}$ y Ozono*	14 may 15:00	NEZ PED	161 142	Contingencia Extraordinaria	17 may 19:00	74 h
	$PM_{2.5}$	25 dic 11:00	NEZ	155	F1 Regional	26 dic 10:00	23 h
2020	Ozono	11 nov 16:00	CCA	155	Fase I	12 nov 01:00	20:00

*Se activó Contingencia Ambiental Extraordinaria por $PM_{2.5}$ y O_3. El 28/05/2019 se publicó el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) que incluye las Fases Preventiva, I, II y Combinada por PM_{10} o $PM_{2.5}$ y O_3.

INFORME ANUAL
2020

ANEXO 6

MOSAICOS

Partículas menores a 2.5 µm ($PM_{2.5}$)

LEYENDA

Concentración	Color
0 - 10 µg/m^3	
11 - 20 µg/m^3	
21 - 30 µg/m^3	
31 - 40 µg/m^3	
41 - 50 µg/m^3	
51 - 60 µg/m^3	
61 - 70 µg/m^3	
71 - 80 µg/m^3	
81 - 90 µg/m^3	
> 90 µg/m^3	

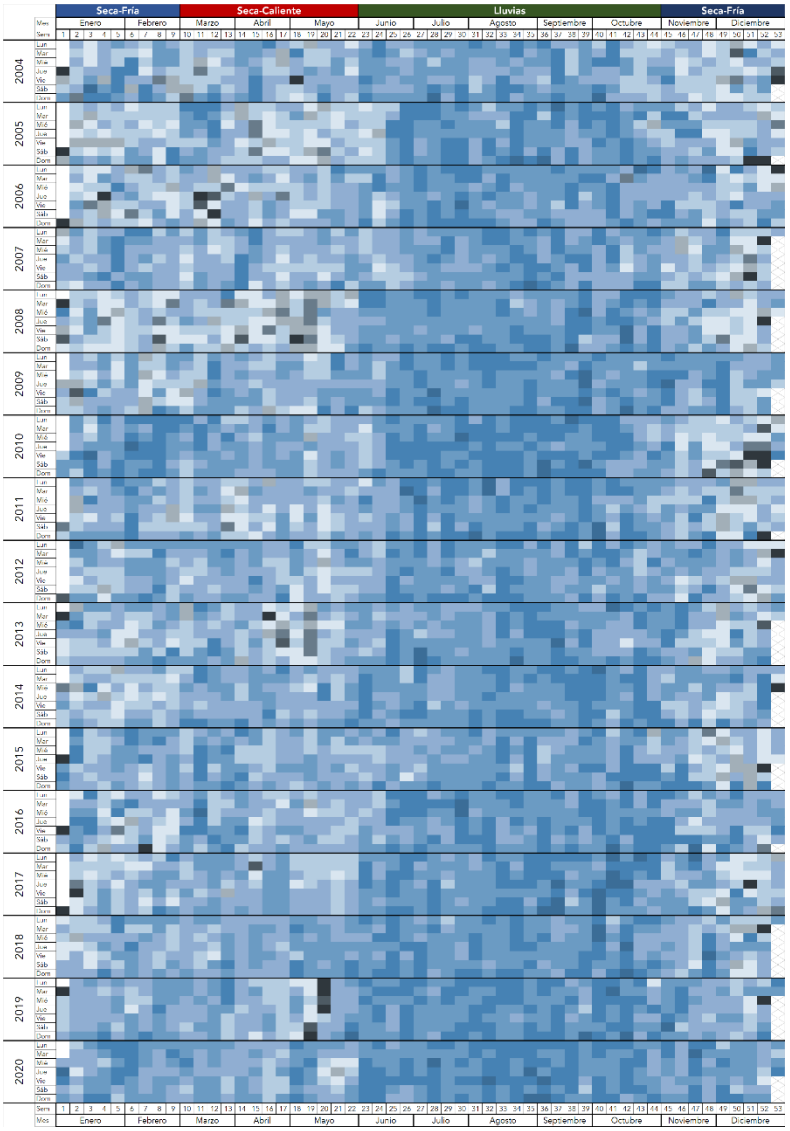


Figura A.VI.1. Mosaico de $PM_{2.5}$. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 2004 al 2020. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de $PM_{2.5}$ de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

Partículas menores a 10 µm (PM_{10})

LEYENDA

Concentración	Color
0 - 25 µg/m^3	
26 - 50 µg/m^3	
51 - 75 µg/m^3	
76 - 100 µg/m^3	
101 - 125 µg/m^3	
126 - 150 µg/m^3	
151 - 175 µg/m^3	
176 - 200 µg/m^3	
> 200 µg/m^3	

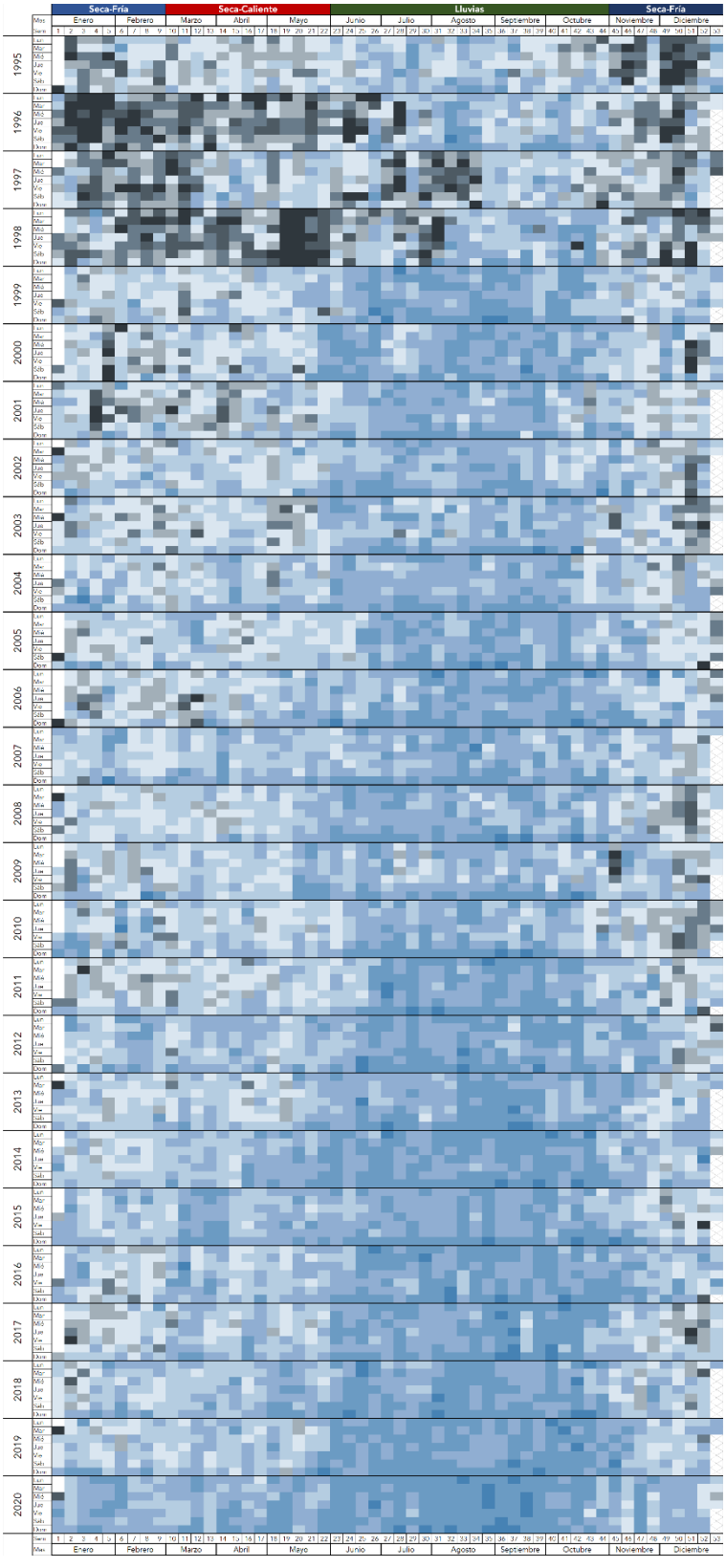


Figura A.VI.2. Mosaico de PM_{10}. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 1995 al 2020. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM_{10} de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

Ozono

LEYENDA	
Concentración	Color
0 - 25 ppb	
26 - 50 ppb	
51 - 75 ppb	
76 - 100 ppb	
101 - 125 ppb	
126 - 150 ppb	
151 - 175 ppb	
176 - 200 ppb	
201 - 225 ppb	
> 225 ppb	

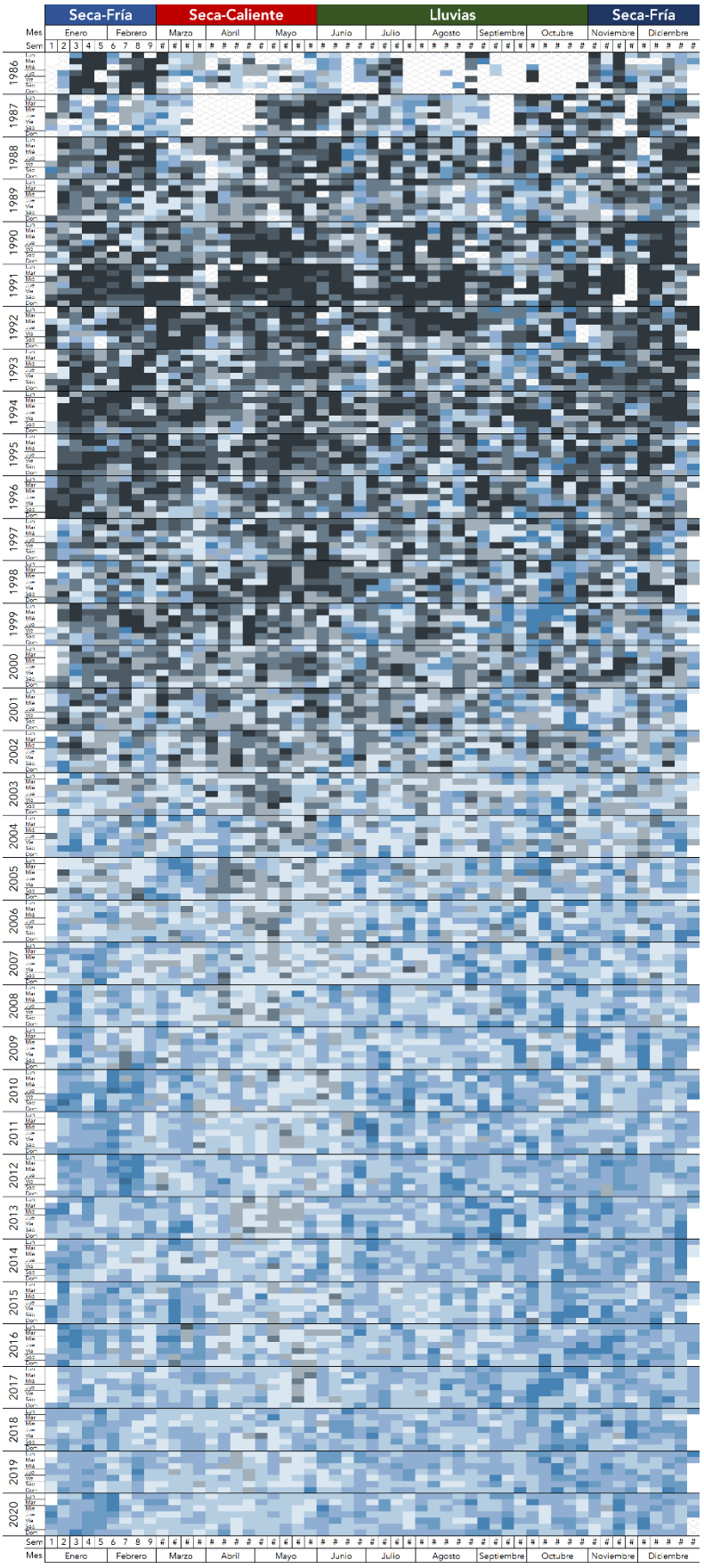


Figura A.VI.3. Mosaico de O_3. Cada celda es el máximo diario del promedio 1 h de 1986 al 2020. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de ozono de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | SEDEMA | CALIDAD DEL AIRE

www.aire.cdmx.gob.mx

@Aire_CDMX

App: AIRE

Disponible para: